Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy

OPEN ACCESS JOURNAL

مقاله پژوهشی

مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مجله بلورشناسی وکانی شناسی ایران

سال سی و دوم، شمارۀ دوم، تابستان ۱۴۰۳، از صفحهٔ ۳۳۹ تا ۳۵۸

شیمی‌کانی و دما-فشار کانی‌های همزیست در سنگ‌های آندزیتی شمال سقز، شمال غرب ایران

سارا دامچین مشاک[۱]، اشرف ترکیان*[۱]، تانیا فورمن[۲]

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- گروه علوم زمین، دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا، دانشگاه پارک، پ.ا. ۱۶۸۰۲، امریکا

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۸/۶، نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۱۰/۹)

چکیده: منطقه سقز در شمال غرب ایران، در شمال پهنه سنندج - سیرجان و استان کردستان قرار دارد. سنگ‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی آن از کانی‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن تشکیل شده‌اند. ترکیب آمفیبول‌ها از منیزیو-هستینگزیت، منیزیو-هورنبلند تا چرماکیت–پارگازیت متفاوت است. ترکیب پیروکسن‌ها اوژیت $Fs_{20.49-13.89}$ $En_{40.37-40.26}$ $Wo_{45.39-39.33}$ و انستاتیت $En_{59.863-71.04}Fs_{26.083-36.850}Wo_{2.842-3.287}$ است. مقدار آنورتیت پلاژیوکلازها از ۳۹٫۲۳ تا ۶۸٫۷۰ درصد نوسان دارد و ترکیب آنها بین آندزین تا لابرادوریت متغیر است. براساس دما و فشارسنجی بر پایه آلومینیوم در شبکه آمفیبول‌ها، دما و فشار تبلور °C ۹۶۱-۸۹۵ و ۲٫۱۱kbar – ۴٫۵۹ بوده است. بر اساس مقدار Ti، دمای °C ۸۰۰ تا ۹۵۰ بدست آمده است. بررسی شیمی کانی کلینوپیروکسن نشان می‌دهد که انواع سنگ‌های آتشفشانی مورد بررسی در دمای ۱۱۰۰ تا ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲ تا ۱۰ کیلوبار متبلور شده‌اند. همچنین مقدار Al^{IV} و Si بیانگر تبلور آمفیبول‌ها در فشارهای پایین است که با مقدار Al^{IV}/Al^{VI} در پیروکسن‌های کم فشار تا فشار متوسط این پژوهش همخوانی دارد. افزون بر این، بررسی مقدار کاتیون‌های $Al^{VI}+2Ti+Cr$ و $Na+Al^{IV}$ در شبکه پیروکسن‌ها و مقادیر $Logf O_2$ و #Fe در شبکه آمفیبول‌ها چنین برداشت می‌گردد که آن‌ها در شرایط فشاربخشی بالا متبلور شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: *پلاژیوکلاز؛ آمفیبول؛ پیروکسن؛ دما- فشارسنجی؛ فشاربخشی اکسیژن.*

مقدمه

در دهه‌های گذشته با پیشرفت فناوری‌های تجزیه نقطه‌ای کانی‌ها، پژوهش‌های مهمی پیرامون تعیین شرایط تبلور، سرشت ماگمایی، عمق جایگیری و موقعیت زمین‌ساختی انجام شده است و پیروکسن، پلاژیوکلاز و آمفیبول از جمله کانی‌های مهم بسیار کارآمد در این زمینه هستند. بطور طبیعی در اتاقک ماگمایی، فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی مختلفی چون تبلور جدایشی، آلایش ماگمایی و آمیختگی ماگمایی رخ می‌دهد و کانی‌ها با ثبت این رخدادها، اطلاعات مهمی در مورد شرایط ترمودینامکی خود از جمله فشار (P)، دما (T) و فشاربخشی اکسیژن (fO_2) در اختیار پژوهشگران می‌گذارند. این کمیت‌های ترمودینامیکی همچنین در انواع ماگماها و بویژه ماگماهای آهکی قلیایی، برای تعیین سری و محیط زمین-ساختی ماگماهای حامل نیز کاربرد دارند [۱]. از آنجا که هر سه کانی پلاژیوکلاز، پیروکسن و آمفیبول کانی‌هایی مهمی در ترکیب ماگماهای آندزیتی هستند، بررسی‌ها و تجزیه نقطه‌ای آن‌ها اطلاعات ارزشمندی را در زمینه خاستگاه ماگمایی، دما و فشارسنجی و فشار بخشی اکسیژن در اختیار قرار می‌دهند. فلات ایران بخش میانی کمربند کوهزایی آلپ - هیمالیا و شامل کوهزاد زاگرس است. بسته شدن اقیانوس تتیس جوان در راستای زمین درز زاگرس باعث همگرایی صفحه‌های عربی و اوراسیا و در پی آن، ایجاد کوهزاد زاگرس شده است.

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۸۱۳۱۴۰۶۲۸۳، پست الکترونیکی: a-torkian@basu.ac.ir

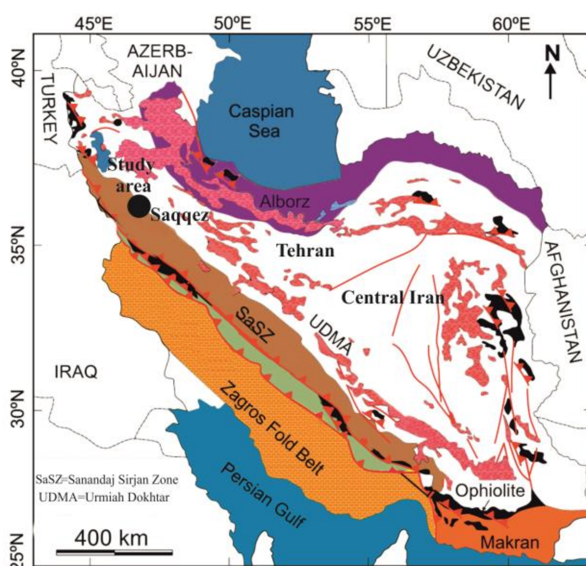
[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]

این برخورد، پهنه‌های مختلف چین‌های ساختاری مهم ایران از جمله پهنه سنندج- سیرجان را بوجود آورده است [۵-۷]. از دیدگاه ساختاری سقز در حاشیه شمال پهنه ماگمایی– دگرگونی سنندج-سیرجان (با طول ۱۲۰۰ و عرض ۱۵۰-۲۰۰ کیلومتر موازی با روند کوهزاد زاگرس) و در حقیقت در محل تلاقی این پهنه با پهنه‌های ساختاری مهاباد- خوی و البرز- آذربایجان واقع شده است [۸].

حریری و همکاران [۸] در شرح ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ سقز آورده‌اند که در این منطقه گاهی ویژگی‌های پهنه دگرگونی سنندج - سیرجان دیده می‌شود، ولی شباهت‌های سنگ‌شناسی نیز با پهنه البرز - آذربایجان (از نظر دارا بودن واحدهای کربناتی آواری پرکامبرین تا مزوزوئیک) نشان می‌دهد. نهشته‌های مربوط به کرتاسه آغازین در آن بطور قابل توجهی گسترش دارند که از جنس سنگ‌های آواری–آتشفشانی هستند. سنگ‌های آندزیتی وابسته به کرتاسه در چارگوش مورد اشاره بررسی شده و بر اساس سن‌سنجی U-Pb سن ۱۱۵- ۱۰۷ میلیون سال (اواخر کرتاسه) برای آن‌ها گزارش شده است [۹]. واحدهای سنگی به سن ائوسن شامل مجموعه کنگلومرایی، ماسه سنگی و آهکی در بخش شمالی ورقه توزیع فراوانی داشته، ولی سنگ‌های آتشفشانی و نهشته‌های آذرآواری وابسته به آن، با این سن حضور چشمگیری ندارند. با توجه به پیدایش سنگواره‌های ویژه زمان ائوسن در میان لایه‌های آهکی و کنگلومرایی همراه گدازه‌ها و توف‌های آندزیتی، آن‌ها را به زمان ائوسن وابسته دانسته‌اند [۸]. در این پژوهش شرایط دما- فشار تبلور و فشاربخشی اکسیژن سنگ‌های آندزیتی منطقه شمال سقز بر پایه از ترکیب کانی‌های یادشده بررسی شده است. این پژوهش با هدف بررسی شرایط دما- فشار تبلور و تعیین فشاربخشی اکسیژن سنگ‌های آندزیتی منطقه شمال سقز با بهرمندی از ترکیب کانی‌های یادشده صورت گرفته است.

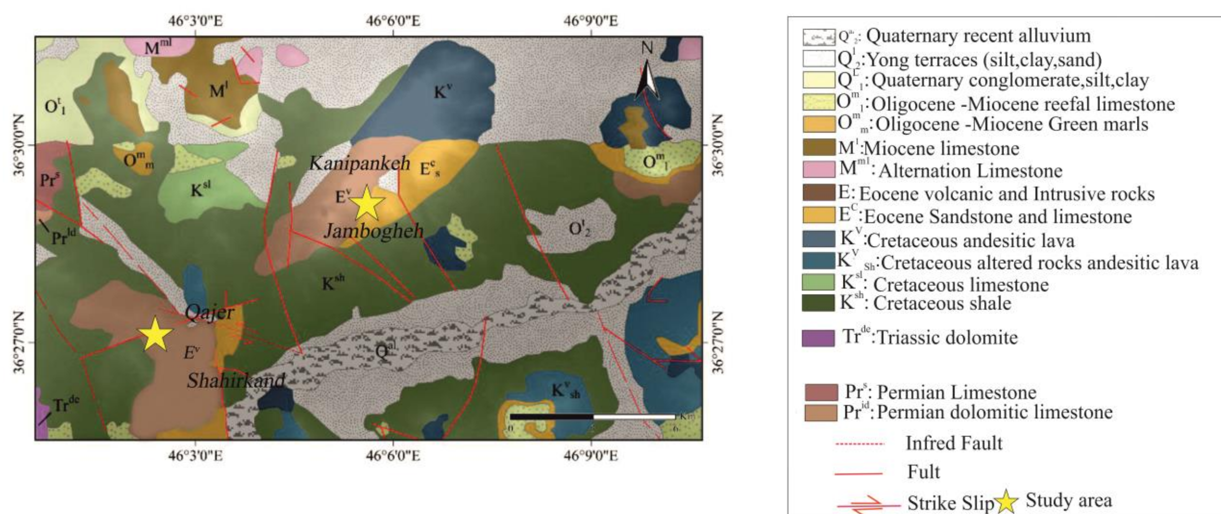
زمین شناسی منطقه مورد بررسی

واحدهای سنگی منطقه مورد بررسی این نوشتار جزیی از سنگ‌های آتشفشانی ائوسن محسوب می‌گردند که در شمال شهر سقز بین طول‌های جغرافیایی ″۰ ′۳۰° ۳۶ و ″۰ ′۲۷° ۳۶ شمالی و عرض‌های جغرافیایی ″۰ ′۳ °۴۶ و ″۲۰ ′۰۹ ۴۶ شرقی قرار دارند (شکل ۱). بازدیدهای صحرایی مکرر و دقیق منطقه نشان می‌دهد که افزون بر گدازه‌ها و توف‌های آندزیتی سنگ‌های نفوذی (با ترکیب گابرو تا دیوریت) و دایک‌های آندزیتی نیز رخنمون دارند. همچنین، سنگ‌های آتشفشانی شامل گدازه‌های بازالتی، آندزیتی و بازالتی‌آندزیتی هستند که البته تعیین سن مطلق آن‌ها نیازمند تجزیه‌های ایزوتوپی است (شکل ۲). از این رو به نظر می‌رسد که پیش از این چنین واحدهای سنگی در منطقه بررسی نشده‌اند و برای نخستین بار در این پژوهش گزارش می‌شوند. پژوهش‌های متعددی پیرامون توده‌های نفوذی فلسیک منطقه انجام شده است. سنگ‌های فلسیک به باور حریری و همکاران [۸] دو نوع گرانیت A و I هستند که با نام‌های G_2, G_F, G_3 معرفی شدند. قدیمی‌ترین این گرانیت‌ها مربوط به اواخر نئوپروتروزوئیک و در ارتباط با فرورانش دریای پروتوتتیس و کرانه فعال اواخر نئوپرتوزوئیک گزارش شده است [۱۰].



شکل ۱ موقعیت منطقه مورد بررسی در نقشه پهنه‌بندی ساختاری ایران، برگرفته از مرجع [۱۱].

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]



شکل۲ نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه مورد بررسی برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰سقز[۸] و نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰میاندوآب [۱۵].

گرانیت نوع A حسن سالاران در شمال شرق سقز به روش U-Pb با سن ۳۶۰ میلیون سال ارزیابی شده است و بالا آمدن گوشته در اثر پسروی اقیانوس پروتوتتیس به زیر گندوانا را عامل اصلی بالاآمدگی پوسته قاره‌ای و در نتیجه تبلور این نوع گرانیت دانسته‌اند [۱۲]. در مورد سنگ‌هایی به سن ائوسن در ورقه یادشده می‌توان به بررسی‌های سپاهی و اطهری [۱۳] پیرامون لوکوگرانیت‌های نوع I حسن سالاران در شمال غرب سقز اشاره کرد. آنها این گرانیت‌ها را جوان‌تر از ۶۰ میلیون سال (ائوسن میانی) و برآمده از آمیختگی ماگمایی در محیط پسابرخورد و فرورانش دانسته‌اند. محمودی و همکاران [۱۴] در مجموعه گرانیت حسن سالاری (سقز) سنگ‌های به سن ۵۹ میلیون سال را گزارش نموده‌اند. در گزارش‌های منطقه مورد بررسی تمرکز ویژه‌ای بر سنگ‌های آتشفشانی بویژه سنگ‌های خروجی به سن ائوسن دیده نمی‌شود.

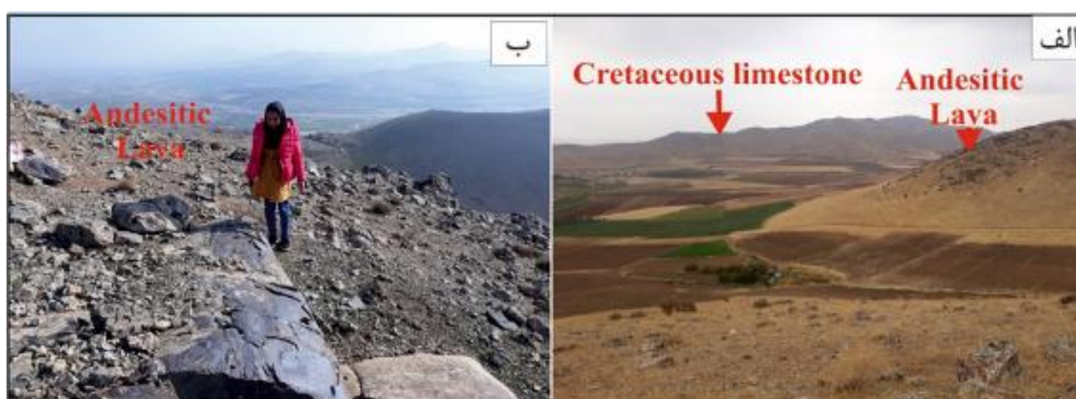
روش بررسی

پس از بررسی ۴۰ مقطع نازک، ۱۰ مقطع برای تعیین ترکیب کانی‌ها انتخاب گردید. در این پژوهش، ۸۰ نقطه از بلورهای آمفیبول، ۴۲ نقطه از پلاژیوکلاز و ۴۰ نقطه پیروکسن (همه بدون دگرسانی) تجزیه نقطه‌ای شدند. ترکیب کانی‌ها با ریزکاو مدل Wisconsin و دوربین SXFive با ولتاژ ۱۵ کیلو ولت و شدت جریان۳۰ نانو آمپر با قدرت تفکیک کمتر از یک میکرومتر با روکشی از کربن به ضخامت ۲۰۰ انگستروم در دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا (آمریکا) انجام شد. ساختار فرمولی کانی‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن به ترتیب با برنامه‌های winfeldspar [۱۶] Winpyrox [۱۷] محاسبه شد. تفکیک آهن Fe^{3+} و Fe^{2+} در پیروکسن‌ها به روش مرجع [۱۸] و در آمفیبول‌ها به روش مرجع [۱۹] انجام شد.

مطالعات صحرایی

واحدهای سنگی آندزیتی منطقه مورد بررسی از سنگ‌های آتشفشانی (ائوسن) هستند که در شمال شهر سقز رخنمون دارند [۸] (شکل ۳). مهم‌ترین مسیرهای دسترسی، روستاهای منطقه شامل کانی‌پانکه، قاجر، شهیرکند و جمبوغه هستند و به دلیل نزدیکی محل‌های نمونه‌برداری به این روستاها، نمونه‌ها به این نام‌ها خوانده شده‌اند. براساس بازدیدهای صحرایی، حجم و گسترش آندزیت‌ها قابل توجه است و در مساحتی حدود ۱۸٫۴۷ کیلومتر مربع رخنمون دارند. رنگ آن‌ها به نسبت تیره (خاکستری رنگ) و ساخت آن‌ها پورفیری است، بطوریکه درشت بلورهای آمفیبول و پیروکسن در زمینه ریزدانه آن‌ها با چشم غیرمسلح قابل مشاهده هستند. دایک‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی در کنار سنگ‌های آتشفشانی در روستای کانی پانکه به نسبت فراوان‌تر دیده می‌شوند. برخی از این دایک‌ها دستخوش دگرسانی شده‌اند. در مناطق مورد بررسی افزون بر سنگ‌های آندزیتی، توده‌های نفوذی (گابرو، دیوریت، منزودیوریت)، سنگ‌های رسوبی شامل آهک و ماسه سنگ رخنمون دارند.

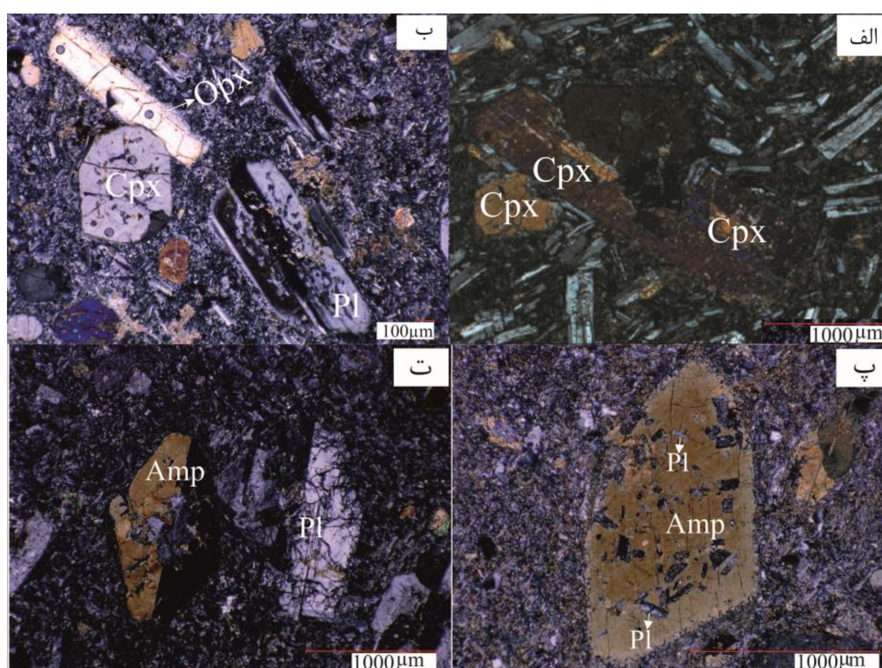
[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]



شکل ۳ تصاویر صحرایی سنگ‌های آتشفشانی در منطقه سقز: الف) دور نمایی از سنگ‌های آندزیتی و آهک‌های کرتاسه (دید به سمت جنوب) و ب) رخنمون سنگ‌های آندزیتی از نزدیک (دید به سمت جنوب).

سنگ نگاری

سنگ‌های آتشفشانی مورد بررسی ترکیب آندزیتی دارند و این واحد سنگی شامل کانی‌های پلاژیوکلاز، آمفیبول، پیروکسن بیشتر با بافت پورفیری است (شکل ۴). انباشت خوشه‌ای درشت بلورهای کانی‌های یادشده در زمینه ریزدانه‌ای از شیشه، پلاژیوکلاز و کانی‌های فرومنیزین، نمایی با بافت گلومروپورفیری به سنگ داده است. همچنین بافت تدریجی در بین بلورهای پیروکسن دیده می‌شود (شکل ۴ ب). پلاژیوکلاز فراوان‌ترین کانی در این سنگ‌هاست و حدود ۸۰ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهد. بلورهای درشت پلاژیوکلاز اغلب شکل دار هستند (شکل ۴ ت) و برخی از آن‌ها دستخوش خوردگی شده‌اند (شکل۴ ت). پیروکسن‌ها شامل انواع کلینوپیروکسن و اورتوپیروکسن ۱۵ درصد از مجموع درشت بلورها و به مقدار کم‌تری زمینه سنگ را تشکیل می‌دهند. این بلورها شکل‌دار هستند و به ندرت خوردگی در آن‌ها دیده می‌شود (شکل ۴ ب).



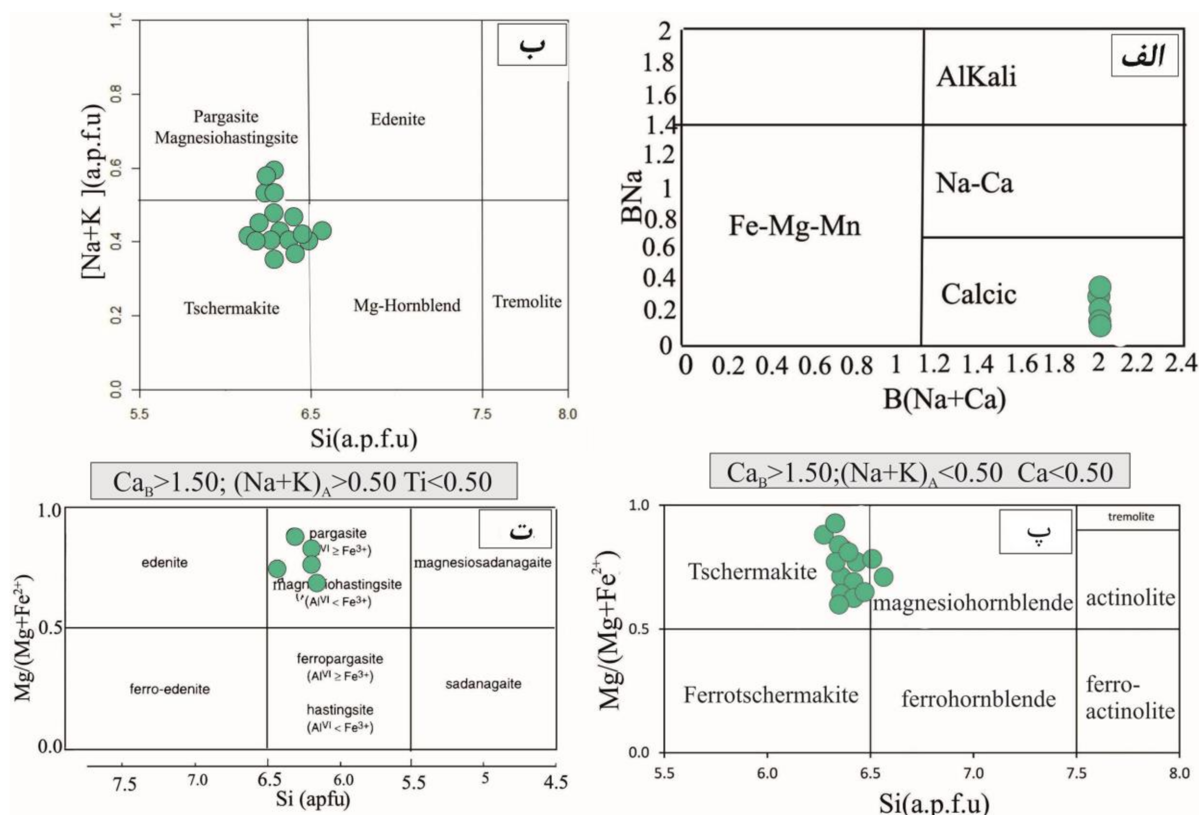
شکل۴ تصاویر میکروسکوپی سنگ‌های آندزیتی منطقه مورد بررسی: الف) درشت بلورهای کلینوپیروکسن نیمه شکل‌دار در بافت گلومروپورفیری، ب) درشت بلور شکل‌دار ارتوپیروکسن در بافت پورفیری در زمینه‌ای ریزدانه، پ) میانبارهایی از کانی پلاژیوکلاز در یک درشت بلور آمفیبول که خود نیز بافت منطقه‌بندی دارد. ت) ماکل ساده در درشت بلور آمفیبول کنار یک درشت بلور پلاژیوکلاز با ماکل کارلسباد-آلبیتی (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از مرجع [۲۰] است).

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]

بلورهای آمفیبول به رنگ قهوه‌ای، بصورت نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار دیده می‌شوند (شکل‌های ۴ پ و ت). آنها در لبه‌ها و مرکز دچار انحلال و ذوب شده‌اند که بافت غربالی را در کانی ایجاد کرده‌اند (شکل‌های ۴پ و ت). میانبارهایی از پلاژیوکلاز در بلورهای آمفیبول دیده می‌شود (شکل ۴ پ). منطقه‌بندی از دیگر ویژگی‌های بارز و رایج در آمفیبول‌های این واحد سنگی است (شکل۴پ).

شیمی‌کانی

آمفیبول: فرمول عمومی آمفیبول‌ها A0–1B2C5T8O22 (OH) (F, Cl)2 است. در جایگاه A عناصر Na,K,Ca,Pb,Li، در جایگاه B عناصر Fe^{2+},Mg, Li Mn^{2+}, Ca, Na، در جایگاه C عناصر Mg, Fe^{2+}, Mn^{2+},Al, Fe^{3+}, Mn^{3+}, Cr^{3+},Ti^{4+},Li و در جایگاه T عناصر Si, Al, Ti4+,Be و در جایگاه w نیز O2+, (OH), F, Cl وارد می‌شوند. البته در جایگاه C عناصر جزئی Sc, V, Co^{2+}, Ni^{2+}, Zn، Zr نیز وارد می‌شوند[۱۹].کانی‌های آمفیبول‌ها بر اساس عناصر Na و Ca در جایگاه B به پنج گروه ۱) منیزیم – آهن- منگنز-لیتیمی، کلسیمی، ۲) کلسیم-سدیمی، ۳) سدیمی و ۴) سدیم-کلسیم–منیزیم ۵)منگنز–لیتیمی تقسیم می‌گردند[۱۹]. آمفیبول‌های سنگ‌های آندزیتی سقز با B (Ca + Na) ≥1.00 و Ti<0.50 (a.p.f.u) BNa<0.50 سرشت آمفیبول‌های کلسیمی را نشان می‌دهند (شکل۵ الف و جدول ۱). بر پایه گروه‌بندی مرجع [۲۱]، در سه گروه چرماکیت–پاراگازیت، منیزیو–هورنبلند و منیزیو – هستینگزیت قرار می‌گیرند (شکل۴) برای تفکیک آمفیبول‌های مورد بررسی از نمودارهای Mg/(Mg+Fe2) نسبت به Si(a.p.f.u) [۱۹] استفاده شد که برخی با #Mg برابر با ۰٫۷۲-۰٫۹۵ و Si کمتر از ۷ در گروه آمفیبول‌های نوع منیزیوهورنبلند، چرماکیت و منیزیوهستینگزیت جایابی می‌شوند (شکل های ۵ پ و ت)



شکل ۵ نمودارهای رده‌بندی آمفیبول‌ها در سنگ‌های آتشفشانی سقز: الف) نمودار BNa نسبت به B(Na+Ca) [۱۹] که در آن، آمفیبول‌ها در قلمرو کلسیمی جایابی می‌شوند، ب) نمودار A[Na+K] در برابر Si [۲۲] که براساس آن، آمفیبول‌ها ترکیب منیزیو-هورنبلند، چرماکیت و منیزیو-هستینگزیت دارند، پ) نمودار #Mg نسبت به Si (a.p.f.u.)؛ [۱۹] که سرشت چرماکیتی و منیزیو هورنبلندی آن‌ها را نشان می‌دهد و ت) نمودار #Mg نسبت به Si که برخی از آمفیبول‌های مورد بررسی ترکیب منیزیو-هستینگزیت را نشان می‌دهند [۱۹].

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]

جدول ۱ نتایج ریزپردازش کانی آمفیبول بر اساس ۲۳ اتم اکسیژن و ۱۳ کاتیون آمفیبول برحسب درصد وزنی (Sch-Prg =چرماکیت- پاراگازیت، Mg- Hst= منیزیو هستینگزیت و Mg-Hbl: منیزیو-هورنبلند).

نمونه	Ssq-43-1	Ssq-43-2	Ssq-43-3	Ssq-43-4	Ssq-43-5	Ssq-43-6
	TSch -Prg	Mg -Hst	Mg- Hst	Mg-Hst	Mg- Hst	Mg- Hst
SiO_2	۴۵٫۰۷	۴۴٫۲۰	۴۳٫۷۱	۴۳٫۸۹	۴۳٫۶۷	۴۳٫۳۵
TiO_2	۱٫۵۴	۱٫۵۰۷	۲٫۲۷	۲٫۵۸	۳٫۰۵	۲٫۹۱
Al_2O_3	۱۰٫۹۰	۱۲٫۴۲	۱۰٫۵۳	۱۰٫۶۴	۱۰٫۶۱	۱۰٫۶۶
FeO	۱۴٫۰۹	۱۲٫۰۲	۱۵٫۱۵	۱۴٫۰۶	۱۳٫۵۸	۱۴٫۳۶
MnO	۰٫۳۶	۰	۰٫۳۲	۰٫۲۷۷	۰	۰٫۳۰
MgO	۱۳٫۱۷	۱۴٫۸۱	۱۳٫۲۰	۱۳٫۵۳	۱۳٫۶۲	۱۳٫۱۴
CaO	۱۱٫۴۸	۱۲٫۰۷	۱۱٫۴۹	۱۱٫۵۳	۱۱٫۶۴	۱۱٫۶۸
Na_2O	۱٫۸۷	۱٫۸۶	۱٫۷۸	۱٫۹۴	۲٫۱۵	۱٫۹۹
K_2O	۱	۱٫۰۸	۰٫۸۰	۰٫۸۱	۰٫۷۷	۰٫۶۹
مجموع	۹۹٫۴۸	۹۹٫۹۶	۹۹٫۲۵	۹۹٫۲۵	۹۹٫۰۹	۹۹٫۰۸
Si	۶٫۳۶	۶٫۲۳	۶٫۲۸	۶٫۳۰	۶٫۲۹	۶٫۲۶
Ti	۰٫۱۶	۰٫۱۶	۰٫۲۴	۰٫۲۷۹	۰٫۳۳	۰٫۳۱
Al^{IV}	۱٫۶۴	۱٫۷۶	۱٫۷۱	۱٫۶۰۹	۱٫۷۰	۱٫۷۳
Al^{VI}	۰٫۱۷	۰٫۳۰	۰٫۰۶	۰٫۱۰۲	۰٫۱۰	۰٫۰۷
Fe^{3+}	۰٫۹۷	۰٫۷۸	۰٫۹۷	۰٫۸۰	۰٫۵۹	۰٫۷۱
Fe^{2+}	۰٫۵۸	۰٫۶۳	۰٫۸۴	۰٫۸۸	۱٫۰۴	۱٫۰۱
Mn	۰٫۰۴	۰	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰	۰٫۰۳
Mg	۳٫۰۶	۳٫۱۱	۲٫۸۲	۲٫۸۹	۲٫۹۳	۲٫۸۳
Ca	۱٫۷۳	۱٫۸۲	۱٫۷۶	۱٫۷۷	۱٫۸۰	۱٫۸۰
Na(B)	۰٫۲۶	۰٫۱۷	۰٫۲۳	۰٫۲۲	۰٫۲۰	۰٫۱۹
Na(A)	۰٫۲۵	۰٫۳۳	۰٫۱۴	۰٫۳۱	۰٫۴۰	۰٫۴۰
K(A)	۰٫۱۸	۰٫۱۹	۰٫۱۵	۰٫۱۴	۰٫۱۴	۰٫۱۲
کل کاتیون ها	۱۵٫۴۰	۱۵٫۴۸	۱۵٫۲۴	۱۵٫۳۳	۱۵٫۵۰	۱۵٫۴۶
$^{A}(Na+K)$	۰٫۴۳	۰٫۵۳	۰٫۵۴	۰٫۵۹	۰٫۵۴	۰٫۶۵
Ca_B	۱٫۷۳	۱٫۸۲	۱٫۷۶	۱٫۷۷	۱٫۸۰	۱٫۸
$^{B}(Ca+Na)$	۲	۲	۲	۲	۲	۲
H_2O_{melt}	۴٫۹	۵٫۷	۵٫۲	۵	۴٫۷	۳٫۱
ΔNNO	۱٫۳	۱٫۲	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۵	۰٫۵
$logfO_2$	-۱۰٫۴	-۹٫۷	-۱۰٫۹	-۱۰٫۸	-۱۰٫۸	-۱۰٫۸
Fe#	۰٫۳۷	۰٫۳۱	۰٫۳۹	۰٫۳۶	۰٫۳۵	۰٫۳۸
Mg#	۰٫۸۴	۰٫۸۳	۰٫۷۷	۰٫۷۶	۰٫۷۳	۰٫۷۳

ادامه جدول ۱

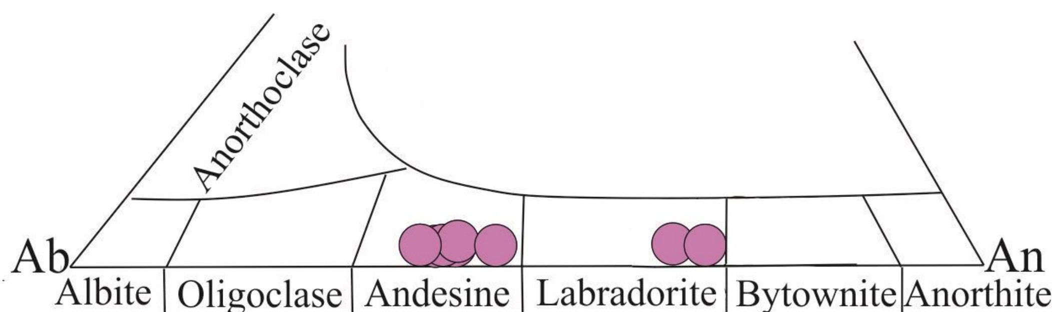
شماره	ssq-50-1	ssq-50-2	ssq-50-3	ssq-50-4	ssq-50-5	ssq-50-6
سنگ شناسی	TSch-Prg	TSch-Prg	TSch-Prg	TSch-Prg	TSch-Prg	TSch-Prg
SiO_2	۴۴٫۱	۴۴٫۶۹	۴۵٫۶۶	۴۴٫۵۰	۴۳٫۴۰	۴۳٫۸
TiO_2	۱٫۳۳	۱٫۶۴۹	۱٫۳۳	۱٫۵۳۷	۱٫۴۵	۱٫۳۱
Al_2O_3	۱۲٫۷۳	۱۲٫۷۵۵	۱۱٫۳۹	۱۲٫۵۲	۱۳٫۱۰	۱۲٫۸
FeO	۱۰٫۷	۱۰٫۱۳۹	۹٫۰۹	۸٫۹۲۱	۱۱٫۵۳	۱۱٫۳۰
MnO	۰٫۱۴	۰٫۱۳۲	۰٫۱۵	۰٫۱۰۷	۰٫۱۵۸	۰٫۱۵
MgO	۱۵٫۶۷	۱۵٫۰۴	۱۵٫۴	۱۶٫۵۱	۱۴٫۲۳	۱۴٫۵
CaO	۱۱٫۶۲	۱۱٫۷۵۴	۱۱٫۷۴	۱۱٫۷۵	۱۱٫۶۷	۱۱٫۶۱
Na_2O	۲٫۰۹	۲٫۰۶	۱٫۹۸	۲٫۱۲۸	۲٫۱۵۸	۲٫۰۸
K_2O	۰٫۵۴	۰٫۷۲۲	۰٫۶۲۱	۰٫۶۸۹	۰٫۵۷	۰٫۵۵
مجموع	۹۸٫۹۲	۹۸٫۹۵	۹۸٫۳	۹۸٫۶۶	۹۸٫۳۱	۹۸٫۱
Si(T)	۶٫۲۴	۶٫۳۱	۶٫۴۳	۶٫۲۴	۶٫۲۰	۶٫۲۱
Al^{IV}(T)	۱٫۷۶	۱٫۶۸۳	۱٫۵۶	۱٫۷۵	۱٫۷۹	۱٫۷۸۵
Al^{VI} (C)	۰٫۳۶۳	۰٫۴۴۲	۰٫۳۳۱	۰٫۳۲۱	۰٫۴۱	۰٫۳۳۶
Ti(C)	۰٫۱۴	۰٫۱۷	۰٫۱۴	۰٫۱۶۲	۰٫۱۶	۰٫۱۴
Fe^{3+}(C)	۰٫۹۱۸	۰٫۶۳۶	۰٫۷۴۵	۰٫۸۶	۰٫۷۸	۰٫۹۳
Fe^{2+}(C)	۰٫۲۵۵	۰٫۵۶۳	۰٫۳۲۷	۰٫۱۸	۰٫۵۹	۰٫۴۱
Mg(C)	۳٫۳۰۶	۳٫۱۶۹	۳٫۴۳	۳٫۴۵	۳٫۰۳	۳٫۱۳
Mn^{2+}(B)	۰٫۰۱۷	۰٫۰۱۶	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Ca(B)	۱٫۷۶۳	۱٫۷۸	۱٫۷۷	۱٫۷۶	۱٫۷۹	۱٫۷۶
Na^{B}(B)	۰٫۲۳	۰٫۲۲	۰٫۲۲	۰٫۲۳	۰٫۲۱	۰٫۲۳
Na(A)	۰٫۳۳	۰٫۳۴	۰٫۳۱	۰٫۳۴	۰٫۳۸	۰٫۳۴
K(A)	۰٫۰۹	۰٫۱۳	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۱۰۶	۰٫۱۰۱
کل کاتیون ها	۱۵٫۴۱	۱۵٫۴۵	۱۵٫۳۸	۱۵٫۴۲	۱۵٫۴۵	۱۵٫۳۸
$(Na+K)_A$	۰٫۴۳۳	۰٫۴۷	۰٫۴۳	۰٫۴۷	۰٫۴۹	۰٫۴۴
Ca_B	۱٫۷۶	۱٫۷۸	۱٫۷۷	۱٫۷۶	۱٫۷۶	۱٫۷۶
$(Ca+Na)_B$	۲	۲	۲	۲	۲	۲
H_2O_{melt}	۶٫۹	۶٫۹	۶	۶	۶	۶٫۴
ΔNNO	۱٫۵	۱٫۲	۱٫۷	۱٫۷	۱	۱٫۳
$logfO_2$	-۹٫۳	-۹٫۸	-۹٫۷	-۹٫۱	-۹٫۷	-۹٫۶
T(°C)	۹۵۶	۹۵۰	۹۲۵	۹۶۰	۹۶۱	۹۵۴
P (Kbar)	۴٫۰۶	۴٫۰۸	۲٫۹۲	۳٫۷۹	۴٫۵۹	۴٫۲۳
Fe#	۰٫۲۶	۰٫۲۷	۰٫۲۳	۰٫۲۳	۰٫۳۱	۰٫۳۰
Mg#	۰٫۹۲	۰٫۸۴	۰٫۹۱	۰٫۹۵	۰٫۸۳	۰٫۸۸

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]

ادامه جدول ۱

شماره	Ssq-39-1	Ssq-39-2	Ssq-39-3	Ssq-39-4	Ssq-39-5	Ssq-39-6	Ssq-39-7
	مرکز	مرکز	مرکز	لبه	لبه	لبه	لبه
سنگ شناسی	TSch-Prg	TSch-Prg	TSch-Prg	TSch-Prg	TSch-Prg	Mg-Hbl	TSch-Prg
SiO_2	۴۳٫۷۸	۴۳٫۲۵	۴۴٫۸۷	۴۴٫۹۰	۴۵٫۴۹	۴۵٫۲۲	۴۴٫۲۰
TiO_2	۱٫۹۹	۲٫۴۵	۱٫۵۳	۱٫۵۷	۱٫۶۱۸	۱٫۴۸	۱٫۴۵
Al_2O_3	۱۰٫۹۳	۱۱٫۹۱	۱۰٫۱۰	۹٫۹۸	۹٫۷۹	۱۰٫۰۳۴	۱۰٫۳۳
FeOt	۱۳٫۸۷	۱۳٫۷۱	۱۳٫۷۹	۱۳٫۹۳	۱۴٫۱	۱۳٫۸۰	۱۴٫۳۸
MnO	۰٫۲۶	۰٫۲۴	۰٫۲۸	۰٫۲۹	۰٫۲۸	۰٫۲۸	۰٫۲۶
MgO	۱۳٫۰۱۹	۱۲٫۶۲	۱۳٫۵۷	۱۳٫۶۰	۱۳٫۲۶	۱۳٫۷۱	۱۳٫۰۳
CaO	۱۱٫۴۸	۱۱٫۲۸	۱۱٫۱۵	۱۱٫۳۴	۱۱٫۳۴	۱۱٫۰۲	۱۱٫۳۳
Na_2O	۱٫۸۸	۲٫۰۷	۱٫۸۱	۱٫۷۵	۱٫۷۳	۱٫۷۸	۱٫۸۱
K_2O	۰٫۷۰	۰٫۷۷	۰٫۷۵	۰٫۷۲	۰٫۶۸	۰٫۶۸	۰٫۸۲
مجموع	۹۷٫۹۰	۹۸٫۳	۹۷٫۸۵	۹۸٫۰۸	۹۸٫۲۸	۹۸٫۰۰	۹۷٫۶۱
Si(T)	۶٫۳۶	۶٫۲۷	۶٫۴۸	۶٫۴۸	۶٫۵۶	۶٫۵۰	۶٫۴۴
$Al^{IV}(T)$	۱٫۶۳۳	۱٫۷۲	۱٫۵۱۴	۱٫۵۱۷	۱٫۴۳	۱٫۴۹	۱٫۵۵
$Mn^{2+}(B)$	۰٫۰۳۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳۴	۰٫۰۳۶	۰٫۰۳۴	۰٫۰۳	۰٫۰۳۲
Ca(B)	۱٫۷۹	۱٫۷۵	۱٫۷۲۷	۱٫۷۲۰	۱٫۷۵	۱٫۷۰	۱٫۷۷
Na(B)	۰٫۲۱	۰٫۲۴	۰٫۲۷	۰٫۲۸	۰٫۲۴	۰٫۳۰	۰٫۲۳
Ca(B)	۱٫۷۹	۱٫۷۵	۱٫۷۲۷	۱٫۷۲۰	۱٫۷۵	۱٫۷۰	۱٫۷۷
Na(B)	۰٫۲۱	۰٫۲۴	۰٫۲۷	۰٫۲۸	۰٫۲۴	۰٫۳۰	۰٫۲۳
Ti(C)	۰٫۲۱	۰٫۲۶	۰٫۱۶	۰٫۱۷	۰٫۱۷	۰٫۱۶	۰٫۲۳
$Al^{VI}(C)$	۰٫۲۴۰	۰٫۳۱	۰٫۲۰	۰٫۱۸	۰٫۲۳	۰٫۲۰	۰٫۱۸
$Fe^{3+}(C)$	۰٫۷۱	۰٫۶۴	۰٫۸۷	۰٫۹۲	۰٫۷۲	۰٫۹۴	۰٫۸۰
$Fe^{2+}(C)$	۰٫۹۷	۱٫۰۱	۰٫۷۹	۰٫۷۵	۰٫۷۱	۰٫۷۱	۰٫۹۴
Mg(C)	۲٫۸۲	۲٫۷۳	۲٫۹۲	۲٫۹۲	۲٫۹۴	۲٫۹۴	۲٫۸۳
Na(A)	۰٫۳۲	۰٫۳۳	۰٫۲۳	۰٫۲۱	۰٫۲۳	۰٫۱۹	۰٫۲۸
K(A)	۰٫۱۳	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۱۳۳	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۱۵
کل کاتیون ها	۱۵٫۴۳	۱۵٫۴۰	۱۵٫۴۸	۱۵٫۳۵	۱۵٫۳۶	۱۵٫۳۲	۱۵٫۴۱
$(Na+K)_A$	۰٫۴۵	۰٫۴۷	۰٫۳۷	۰٫۳۴	۰٫۳۶	۰٫۳۲	۰٫۴۲
Ca_B	۱٫۷۹	۱٫۷۵	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۱٫۷۵	۱٫۶۹	۸۹۸
$(Ca+Na)_B$	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
H_2O_{melt}	۶٫۱	۵٫۵	۵٫۶	۵٫۹	۵٫۶	۵٫۶	۵٫۷
ΔNNO	۰٫۷	۰٫۴	۱٫۱	۱٫۱	۱	۱٫۲	۰٫۸
$logfO_2$	-۱۰٫۹	-۱۰٫۸	-۱۱٫۱	-۱۱٫۱	-۱۱٫۵	۱۱٫۲-	-۱۱٫۱
Fe#	۰٫۳۷	۰٫۳۷	۰٫۳۶	۰٫۳۶	۰٫۳۷	۰٫۳۶	۰٫۳۸
Mg#	۰٫۷۴	۰٫۷۲	۰٫۷۸	۰٫۷۹	۰٫۷۴	۰٫۸۰	۰٫۷۵

پلاژیوکلاز : پلاژیوکلاز کانی تکتوسیلیکات رایج در سامانه‌های ماگمایی و از جمله در سنگ‌های آندزیتی است و اطلاعات با ارزشی در مورد شرایط فیزیکوشیمیایی ماگما در اتاقک ماگمایی ارائه می‌دهد [۲۲]. مقدار SiO_2 و Al_2O_3 پلاژیوکلازهای سنگ‌های آندزیتی مورد بررسی به ترتیب از ۶۰٫۲۶ تا ۵۱٫۰۴ درصد وزنی و از ۲۰٫۹۱ تا ۳۱٫۴۵ درصد وزنی متغیر است. همچنین آن‌ها دارای K2O در گستره (۰٫۳۱-۰٫۰۵ درصد وزنی، Na2O در گستره ۷٫۶۰ - ۷٫۳۸ درصد وزنی و CaO در گستره ۷٫۵۲ - ۱۴٫۰۵ درصد وزنی هستند. چنان که در نمودار مرجع [۲۳] (شکل۶) دیده می‌شود، درشت بلورها ترکیب آندزین تا لابرادوریت (An39.23-68.70) دارند (جدول ۲).



شکل۶ نمودار Ab-An-Or [۲۳] که نشان دهنده ترکیب آندزین تا لابرادوریت پلاژیوکلازهای درشت بلور در سنگ‌های آندزیتی مورد بررسی است.

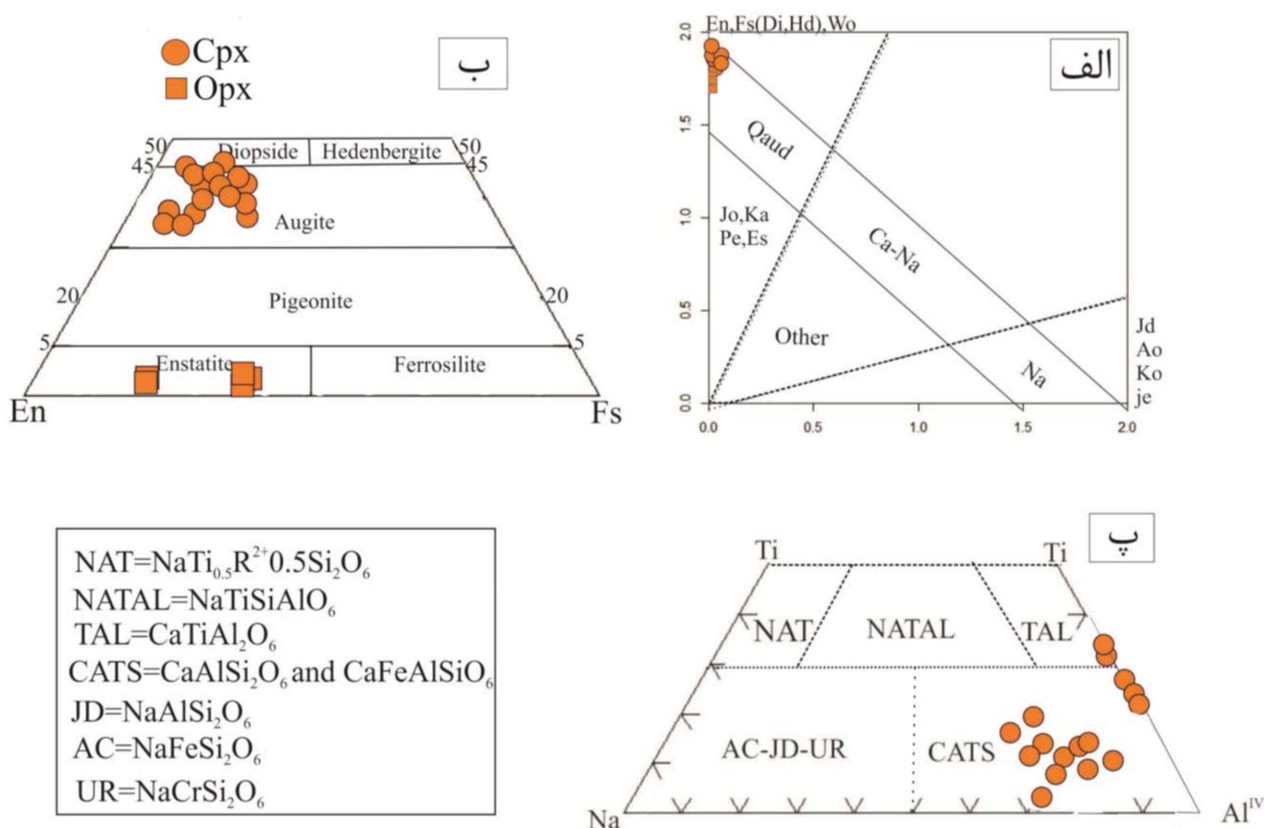
[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]

جدول ۲ نتایج ریزپردازش کانی پلاژیوکلاز بر اساس ۸ اتم اکسیژن (برحسب درصد وزنی).

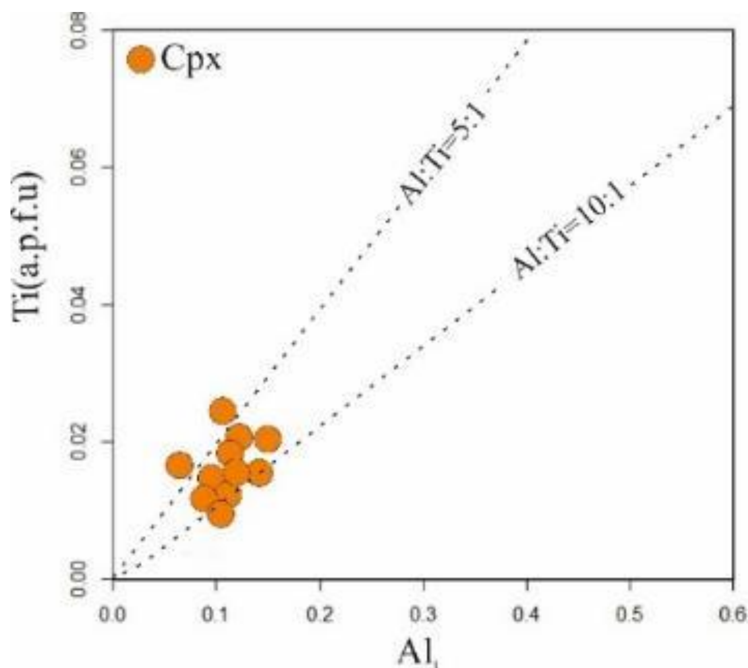
کانی	پلاژیوکلاز۱			پلاژیوکلاز۲			پلاژیوکلاز۳		
	Ssq-43-1	Ssq-43-2	Ssq-43-3	Ssq-43-4	Ssq-43-5	Ssq-43-6	Ssq-43-7	Ssq-39-2	Ssq-39-3
SiO_2	۵۹٫۶۰	۵۸٫۶۰	۵۹٫۷۰	۶۰٫۲۶	۵۹٫۶۸	۶۰٫۱۸	۵۹٫۵۹	۵۱٫۰۴	۵۱٫۵۹
TiO_2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	bdl	۰٫۰۰۱	۰٫۰۲
Al_2O_3	۲۴٫۶۲	۲۴٫۶۲	۲۰٫۹۱	۲۲٫۵۴	۲۲٫۶۹	۲۵٫۵۴	۲۴٫۴۸	۳۱٫۳۲	۳۱٫۴۵
FeO	۰٫۴۴	۰٫۳۲	۰٫۲۴	۰٫۱۸	۰٫۱۷	۰٫۱۶	۰٫۱۳	۰٫۴۹	۰٫۵۰
MnO	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۰۵	۰٫۰۱۴
MgO	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۳۷	۰٫۰۲۶
CaO	۸٫۴۳	۹٫۴۳	۹٫۹	۸٫۶۷	۸٫۶۱	۷٫۵۲	۸٫۸۱	۱۴٫۰۵	۱۳٫۶۶
Na_2O	۶٫۹۸	۶٫۹۷	۶٫۱۱	۶٫۵۷	۶٫۷۴	۵٫۵۱	۷٫۳۸	۳٫۴۷	۳٫۶۰
K_2O	۰٫۰۵	۰٫۲۸	۰٫۲۹	۰٫۲۷	۰٫۳۱	۰٫۳	۰٫۲۹	۰٫۱۰	۰٫۱۳
مجموع	۱۰۰٫۲۶	۱۰۰٫۲۴	۹۷٫۱۸	۹۸٫۵۰	۹۸٫۲۲	۱۰۰٫۲۳	۱۰۰٫۶۷	۱۰۰٫۵۱	۱۰۰٫۹۹
Si	۲٫۶۶	۲٫۶۱۹	۲٫۷۷۹	۲٫۷۷۵	۲٫۷۳۱	۲٫۶۹۹	۲٫۶۴۵	۲٫۳۱۳	۲٫۳۲۶
Ti	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۰۱
Al	۱٫۲۹۷	۱٫۲۹۷	۱٫۱۴۸	۱٫۲۱۵	۱٫۲۲۴	۱٫۳۵	۱٫۲۸۱	۱٫۶۷۳	۱٫۶۷۱
Fe^{3+}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Fe^{2+}	۰٫۰۱۲	۰٫۰۱۲	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۰۲۰	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۱۹	۰٫۰۱۹
Mg	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲
Ca	۰٫۴۰۴	۰٫۴۵۲	۰٫۷۲۵	۰٫۴۲۵	۰٫۴۲۲	۰٫۳۶۲	۰٫۴۱۹	۰٫۶۸۲	۰٫۶۶۰
Mn	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰٫۰۰۱
Na	۰٫۶۰۵	۰٫۶۰۵	۰٫۲۶۵	۰٫۵۸۲	۰٫۵۹۸	۰٫۵۵۶	۰٫۶۳۳	۰٫۳۰۵	۰٫۳۱۵
K	۰٫۰۱۷	۰٫۰۱۶	۰٫۰۱۷	۰٫۰۱۶	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۷	۰٫۰۱۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۷
کل کاتیون ها	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
X_{An}	۳۹٫۳۸	۴۲٫۱۳	۴۰٫۶۷	۴۶٫۴۶	۵۷٫۸۵	۳۹٫۳۸	۳۹٫۲۳	۶۸٫۷۰۹	۶۷٫۱۹۳
X_{Ab}	۵۸٫۹۵	۵۶٫۳۸	۵۷٫۵۸	۵۱٫۹۱	۴۰٫۶۷	۵۸٫۹۲	۵۹٫۲۳	۳۰٫۷۰۸	۳۲٫۰۴۵
X_{Or}	۱٫۶۶۸	۱٫۴۸	۱٫۷۴	۱٫۶۱۹	۱٫۷۴	۱٫۶۶	۱٫۵۳۷	۰٫۵۸۲	۰٫۷۶۱

پیروکسن‌ها: پیروکسن با فرمول عمومی $M2M1T_2O_6$ از خانواده سیلیکات‌های تک زنجیره‌ای است. پیروکسن‌ها یک جایگاه چاروجهی (T) و دو جایگاه هشت وجهی M_1 و M_2 دارند. جمع کاتیون در T برابر با ۲ و جایگاه عناصر Si^{4+} وAl^{3+} و Fe^{3+} است، اما در جایگاه‌های M1 و M2 یون های Ti^{4+}, Li^+, و همچنین Cr^{3+}, V^{3+}, Zr^{4+}, Sc^{3+}, Zn^{2+} Mg^{2+}, Fe^{2+} Ca^{2+}, Na^+ و K^+ جایگزین می‌شوند. بر اساس قرارگیری کاتیون‌ها در جایگاه‌های M_1 و M_2، آن‌ها به چهار گروه رده‌بندی می‌گردند: ۱) پیروکسن‌های کلسیم، منیزیم و آهن‌دار(Ca-Mg-Fe)، ۲) پیروکسن‌های کلسیم و سدیم‌دار (Ca-Na)، ۳) پیروکسن‌های سدیم‌دار(Na)، ۴) سایر پیروکسن‌ها. در سنگ‌های مورد بررسی آندزیتی شمال سقز، پیروکسن‌های درشت بلور در نمودار مرجع [۲۴] در گستره Ca-Mg-Fe قرار می‌گیرند و از نوع اوژیت $En_{40.37-40.26}$ $_{39.33}$- $Fs_{20.49-13.89}Wo_{45.39}$ و کلینوانستاتیت $En_{71.04-59.863}Fs_{36.850-}$ $_{26.083}Wo_{3.287.2.842}$ هستند (شکل۷ ب و جدول‌های ۳ و ۴). در شبکه کلینوپیروکسن‌ها، مقادیر متفاوتی از کاتیون‌های Al, Na, Ti وجود دارد که مقدار آنها بستگی به شرایط فیزیکوشیمیایی ماگما دارد. نمودار $Ti-Na-Al^{IV}$ [۲۵] نشان‌دهنده روند جانشینی کاتیون‌ها و تغییر ترکیب شیمیایی در شبکه پیروکسن‌هاست[۱۸] (شکل ۷ پ). در این شکل، پیروکسن‌ها بر اساس جانشینی کاتیون‌های Al, Na, Ti در جایگاه هشت‌وجهی به ۵ گروه NAT, NATAL, TAL, CATS و AC-JD-UR رده‌بندی شده‌اند. از مهم‌ترین جانشینی‌ها در پیروکسن‌های Mg-Fe دار، جانشینی زوج کاتیون ^{IV}Al - $^{VI}R^{3+}$ است. این ویژگی گویای جانشینی Al به شکل مؤلفه چرماک (CATS) در شبکه پیروکسن‌ها و نشان دهنده وجود Al کافی برای متعادل کردن کمبود Si در جایگاه چاروجهی است. شکل‌های ۷پ و ۸ به ترتیب نشان می‌دهند که پیروکسن‌های مورد بررسی غنی از کلسیم (CATS) هستند و Al با ورود Ti به شبکه پیروکسن موازنه شده است[۲۶]. از آنجا که نسبت Ti:Al در بیشتر نمونه ها برابر با ۱۰:۱ و بزرگتر از ۵:۱ است، نقش مؤلفه‌های Na دار ($NaR^{3+}Si_2O_6$) ناچیز اما نقش مؤلفه چرماک (CaR^{3+} R^{3+} SiO_6) بیشتر بوده است.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]



شکل۷ الف نمودار رده‌بندی پیروکسن‌ها [۲۴]، که در آن پیروکسن‌های مورد بررسی در بخش آهن-منیزیوم-کلسیم (Qaud) جایابی شده‌اند؛ ب) نمودار مثلثی Wo-En-Fs [۲۴] نشان می‌دهد که پیروکسن‌ها از نوع اوژیت و انستاتیت هستند؛ پ) نمودار مثلثی $Ti-Na-Al^{IV}$ [۲۵] که گویای ویژگی غنی از کلسیم بودن کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی است.



شکل ۸ نمودار موازنه نسبت Ti نسبت به Alt [۲۶] کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی.

جدول ۳ نتایج ریزپردازش کانی کلینوپیروکسن بر اساس ۶ اتم اکسیژن بر حسب درصد وزنی (CPX =کلینوپیروکسن).

کانی	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx
نمونه	Ssq-9-1	Ssq-9-2	Ssq-9-3	Ssq-9-4	Ssq-9-5	Ssq-9-6	Ssq-9-7	Ssq-9-8	ssq-48-1
SiO_2	۵۳٫۲۷	۵۲٫۸۰	۵۲٫۴۲	۵۲٫۱۲	۵۲٫۳۷	۵۱٫۹۷	۵۱٫۸۶	۵۲٫۶۹	۵۲٫۱۷۸
TiO_2	۰٫۳۶	۰٫۳۱	۰٫۶۵	۰٫۵۵	۰٫۸۳	۰٫۸۶	۰٫۳۱	۰٫۶۰	۰٫۴۴
Al_2O_3	۱٫۹۸	۲٫۳۲	۲٫۶۸	۲٫۷۳	۲٫۲۴	۲٫۴۳	۲٫۳۲	۱٫۵۱۱	۲٫۶۶
FeO	۱۰٫۷۷۸	۸٫۹۱۴	۱۰٫۳۱۴	۸٫۵۳۴	۱۰٫۵۲۶	۱۲٫۷۵۲	۱۱٫۴۷۱	۱۲٫۴۱۱	۸٫۱۹
Fe_2O_3	۰٫۱۱۳	۱٫۱۳۲	۰٫۱۹	۱٫۵۸۲	۲٫۰۲۸	۰٫۱۸۲	۱٫۱۶۳	۰	۱٫۵۴۳
MnO	۰٫۷۴	۰٫۳۰	bdl	۰٫۳۲	۰٫۴۹	۰٫۴۶	۰٫۳۴	۰٫۴۵	۰٫۲۵
MgO	۱۴٫۵۸	۱۴٫۵۸	۱۳٫۷۴	۱۴٫۰۴	۱۴٫۱۰	۱۴٫۱۰	۱۴٫۴۷	۱۵٫۱۵	۱۶٫۱۵۱
CaO	۱۹٫۲۶	۲۰٫۸۷	۲۰٫۷۹	۲۱٫۷۷	۲۰٫۱۱	۱۹٫۱۶	۱۹٫۲۶	۱۸٫۴۸	۱۸٫۸۷۹
Na_2O	۰	۰	۰	۰	۰٫۳۱۰	۰	۰	۰	.۰٫۲۸۹
K_2O	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۰۸
NiO	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۳۷
مجموع	۱۰۱٫۱	۱۰۱٫۲۳	۱۰۰٫۷۸	۱۰۱٫۶۴	۱۰۰٫۹۷	۱۰۱٫۹۱	۱۰۱٫۱۹	۱۰۱٫۲۹	۱۰۰٫۲۹
Si	۱٫۹۷۹۸	۱٫۹۸۱۴	۱٫۹۳۹۴	۱٫۹۰۷۹	۱٫۹۱۱۸	۱٫۹۲۰۳	۱٫۹۲۴۱	۱٫۹۵۰۳	۱٫۹۱۸۴
Al^{IV}	۰٫۰۲۰۲	۰٫۰۱۸۶	۰٫۰۶۵۱	۰٫۰۹۲۱	۰٫۰۸۸۲	۰٫۰۷۹۷	۰٫۰۷۵۹	۰٫۰۴۹۷	۰٫۰۸
کل T(IV)	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
Ti	۰٫۰۱۰۳	۰٫۰۰۸۹	۰٫۰۱۸۱	۰٫۰۱۵۲	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۴۱	۰٫۰۰۸۸	۰٫۰۱۶۷	۰٫۰۱
Al^{VI}	۰٫۰۶۶۷	۰٫۰۸۴۲	۰٫۰۵۱۶	۰٫۰۲۶۱	۰٫۰۰۸۵	۰٫۰۲۶۴	۰٫۰۲۵۷	۰٫۰۱۶۲	۰٫۰۳
Mg	۰٫۸۰۸	۰٫۸۰۹	۰٫۷۵۶۲	۰٫۷۶۶۲	۰٫۷۶۷۶	۰٫۷۷۷	۰٫۸۰۰۴	۰٫۸۳۵۹	۰٫۸۸۵۳
Cr	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Fe^{2+}	۰٫۱۱۸	۰٫۰۶۵۴	۰٫۱۶۸۹	۰٫۱۴۹	۰٫۱۴۵۲	۰٫۱۶۷۴	۰٫۱۳۲۶	۰٫۱۳۱۱	۰٫۰۲۴۶
Fe^{3+}	۰٫۰۰۳۲	۰٫۰۳۲	۰٫۰۰۵۳	۰٫۰۴۳۶	۰٫۰۵۵۷	۰٫۰۰۵۱	۰٫۰۳۲۵	۰٫۰۰۰۱	۰٫۰۴۲۷
کل M1(VI)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
Fe^{2+}	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۲
Mg	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Mn	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۰۷
K	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۰۰۴
Ca	۰٫۷۷	۰٫۷۷	۰٫۸۲	۰٫۸۵	۰٫۷۹	۰٫۷۶	۰٫۷۷	۰٫۷۳	۰٫۷۴
Na	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۲
کل M2(VI)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
Mg#	۰٫۷۰	۰٫۷۴	۰٫۷۰	۰٫۷۱	۰٫۶۷	۰٫۶۶	۰٫۶۹	۰٫۶۸	۰٫۷۷
Q	۱٫۹۱۰۲	۱٫۸۶۳۸	۱٫۸۹۷۱	۱٫۸۸۱۳	۱٫۸۷۵۷	۱٫۹۲۹۹	۱٫۹۲۲	۱٫۹۵۲۹	۱٫۸۸۱
J	۰	۰	۰٫۰۵۶	۰٫۰۴۷۸	۰٫۰۴۳۹	۰	۰	۰	۰۴۱۲۰
Wo	۴۰٫۱۶	۴۳٫۴۳	۴۳٫۳۶	۴۵٫۳۹	۴۱٫۹۵	۳۹٫۳۲	۴۱٫۶۴	۳۷٫۵۳	۳۹٫۵۴
En	۴۲٫۳۱	۴۱٫۵۶	۳۹٫۸۶	۴۰٫۳۷	۴۲٫۹۲	۴۰٫۲۶	۳۹٫۸۴	۴۲٫۸۱	۴۷٫۰۶
Fs	۱۷٫۵۴	۱۵٫۰۱	۱۶٫۷۸	۱۳٫۸۹	۱۷٫۱۳	۲۰٫۴۲	۱۸٫۵۲	۱۹٫۶۷	۱۳٫۴
XPT	۳۹٫۵۵	۳۸٫۵۱	۳۹٫۰۲	۳۸٫۷۴	۳۹٫۱۱۶	۳۶٫۳۹	۳۸٫۹۷	۳۹٫۹۲	۳۸٫۰۹
YPT	-۲۷٫۲۸	-۲۷٫۷۷	-۲۷٫۱۳	-۲۷٫۹۰	-۲۶٫۷۶	-۲۵٫۷۳	-۲۶٫۶۰	-۲۶٫۳۹	-۲۸٫۶۸
A^{IV}/Al^{VI}	۰٫۳۰	۰٫۲۲	۱٫۲۶	۳٫۵۲	۱٫۳۷	۳٫۰۱	۲٫۹۵	۳٫۰۶	۲٫۳۹

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]

ادامه جدول ۳

کانی	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx
نمونه	ssq-48-2	ssq-48-3	ssq-48-4	ssq-48-5	ssq-40-1	ssq-40-2	ssq-40-3	ssq-40-4
SiO_2	۵۳٫۶۵۶	۵۲٫۷۶۷	۵۰٫۷۵۸	۵۱٫۵۱۵	۵۰٫۹۶۵	۵۱٫۴۱	۵۲٫۰۱۷	۵۲٫۲۸
TiO_2	۰٫۰۸۴	۰٫۳۸۲	۰٫۷۴۴	۰٫۴۹۸	۰٫۷۱۳	۰٫۵۴۴	۰٫۵۱۲	۰٫۵۱۷
Al_2O_3	۱٫۶۷۵	۱٫۹۵۸	۳٫۵۲۸	۲٫۷۱۶	۲٫۷۸۶	۳٫۱۸	۲٫۲۲۹	۲٫۶۲
FeO	۲٫۷۹	۷٫۸۶	۷٫۷۲	۹٫۳۴	۱۰٫۲۳	۶٫۸۵۶	۸٫۱۵۸	۶٫۱۶۶
Fe_2O_3	۱٫۲۱۲	۱٫۰۲	۲٫۶۲	۱٫۹۱۸	۱٫۸۹۰	۱٫۹۰۹	۱٫۴۴۹	۱٫۰۸۳
MnO	۰٫۱۳	۰٫۲۳	۰٫۲۲۹	۰٫۲۸۳	۰٫۳۰۴	۰٫۲۱۳	۰٫۳۰۱	bdl
MgO	۱۸٫۵۰۷	۱۶٫۰۸۴	۱۴٫۵۹۲	۱۴٫۲۵۴	۱۴٫۰۱۹	۱۵٫۲۱۸	۱۴٫۷۲۵	۱۵٫۵۰
CaO	۲۱٫۲۰۵	۱۹٫۶۸۳	۲۰٫۰۲۲	۱۹٫۸۳۷	۱۹٫۰۷۵	۲۰٫۷۱۷	۲۰٫۶۶	۲۰٫۷۲
Na_2O	۰٫۲۴۶	۰٫۳۰۶	۰٫۳۸	۰٫۳۴	۰٫۳۴	۰٫۲۶	۰٫۳۱۹	۰
K_2O	۰	۰	۰	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۲	۰	۰٫۰۰۱	۰
NiO	۰٫۰۲۴	۰٫۰۲۲	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۹	۰	۰	۰٫۰۱۷	۰
مجموع	۹۹٫۲۶	۱۰۰	۱۰۰٫۶۱۱	۱۰۰٫۷۲۴	۱۰۰٫۳۲	۱۰۰٫۰۴۷	۱۰۰٫۴۴	۹۸٫۸۸
Si	۱٫۹۵۳۵	۱٫۹۴۳۲	۱٫۸۷۹۴	۱٫۹۱۲۱	۱٫۹۰۴۶	۱٫۸۹۶۶	۱٫۹۲۸	۱٫۹۵۳
Al^{IV}	۰٫۰۴۶۵	۰٫۰۵۶۸	۰٫۱۲۰۶	۰٫۰۸۷۹	۰٫۰۹۵۴	۰٫۱۰۱۴	۰٫۰۷۲	۰٫۰۴۶
کل T(IV)	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
Al^{VI}	۰٫۰۲	۰٫۲۹۴	۰٫۰۳۳۳	۰٫۰۳۰۹	۰٫۰۲۷۳	۰٫۰۳۷	۰٫۰۲۵۴	۰٫۰۶۹
Mg	۰٫۹۳	۰٫۸۸۳	۰٫۸۰۳۸	۰٫۷۸۸۷	۰٫۷۸۱	۰٫۸۳۷۸	۰٫۸۱۳	۰٫۸۳۶
Ti	۰٫۰۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲۰۷	۰٫۰۱۳۹	۰٫۰۲	۰٫۰۱۵۱	۰٫۰۱۴۳	۰٫۰۱
Cr	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Fe^{2+}	۰	۰٫۰۴۷۸	۰٫۰۶۸۴	۰٫۱۱۲۶	۰٫۱۱۸	۰٫۰۵۷	۰٫۱۰۵۸	۰٫۰۲۲
Fe^{3+}	۰٫۰۲	۰٫۰۲۸۵	۰٫۰۷۳۲	۰٫۰۵۳۴	۰٫۰۵۳	۰٫۰۵۳۱	۰٫۰۴۰۴	۰٫۰۳
Ni	۰	۰				۰	۰٫۰۰۰۵	۰
کل M1(VI)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
Mg	۰٫۰۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Mn	۰٫۰۰۴	۰	۰٫۰۰۷۲	۰٫۰۰۸۹	۰٫۰۰۹۶	۰٫۰۰۶۷	۰٫۰۰۹۴	۰
Ca	۰٫۸۲	۰٫۷۷	۰٫۷۹۴۳	۰٫۷۸۸۹	۰٫۷۶۳۹	۰٫۸۱۹۷	۰٫۸۲۰۵	۰٫۸۲۹
K	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Na	۰٫۰۱۷	۰٫۰۲۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱۸	۰٫۰۲۲	۰
Fe^{2+}	۰٫۰۸	۰٫۱۹	۰٫۱۷۰۶	۰٫۱۷۷۵	۰٫۲۰۱۵	۰٫۱۵۴۷	۰٫۱۴۷۱	۰٫۱۷
کل M2(VI)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
Mg#	۰٫۹۲	۰٫۷۸	۰٫۷۷	۰٫۷۳	۰٫۷۰	۰٫۷۹	۰٫۷۶	۰٫۸۱
Q	۱٫۹۱۶۸	۱٫۹۰۱۸	۱٫۸۳۷	۱٫۸۶۷	۱٫۸۶۴	۱٫۸۶۹	۱٫۸۸۷	۱٫۸۸۵
J	۰٫۰۳۴۷	۰٫۰۴۳۷	۰٫۰۵۵۹	۰٫۰۴۹۱	۰٫۰۵۰۱	۰٫۰۳۷۸	۰٫۰۴۵۸	۰
En	۴۶٫۴۲	۴۶٫۴۳	۴۳٫۷۵	۴۲٫۲۳	۴۱٫۸۸	۴۴٫۸۲	۴۳٫۱۲	۴۵٫۸
Fs	۱۰٫۴۳	۱۲٫۷۳	۱۳٫۰۱	۱۵٫۵۳	۱۷٫۱۶	۱۱٫۳۳	۱۳٫۴	۱۰٫۲۲
Wo	۴۳٫۱۵	۴۰٫۸۴	۴۳٫۲۳	۴۲٫۲۴	۴۰٫۹۶	۴۳٫۸۵	۴۳٫۴۸	۴۳٫۹۳
XPT	۳۸٫۹۷	۳۸٫۸۲	۳۶٫۶۹	۳۷٫۹۹	۳۷٫۹۳	۳۷٫۶۲	۳۸٫۵۱	۳۸٫۲۱
YPT	-۳۲٫۴۷	-۲۸٫۹۳	-۲۷٫۸۱	-۲۷٫۲۳	-۳۰٫۰۶	-۲۸٫۷۷۵	-۲۸٫۰۱	-۲۹٫۳۱
Al^{IV}/Al^{VI}	۱٫۸۳۰	۱٫۹۳	۳٫۹۱	۲٫۸۴	۳٫۴۹	۲٫۷۴	۲٫۸۳	۰٫۶۷

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]

جدول ۴ نتایج ریزپردازش کانی‌های ارتوپیروکسن (Opx) بر پایه ۶ اتم اکسیژن، (Opx=ارتوپیروکسن).

کانی	Opx- لبه	Opx - مرکز	Opx- مرکز	Opx- مرکز	Opx - لبه
نمونه	ssq-40-1	ssq-40-2	ssq-40-3	ssq-40-4	ssq-40-5
SiO_2	۵۰٫۳۸	۵۰٫۱۳	۵۰٫۷۶	۵۰٫۳۷	۵۰٫۵۱
TiO_2	۰٫۲۲	۰٫۲۳	۰٫۳۳	۰٫۲۹	۰٫۴۶
Al_2O_3	۲٫۳۶	۲٫۰۰	۲٫۰۲	۲٫۸۳	۲٫۸۳
FeO	۱۵٫۷۳۱	۱۰٫۰۹۶	۱۱٫۲۳۸	۲۰٫۰۶۸	۲۰٫۴۷۲
Fe_2O_3	۵٫۸۸۴	۸٫۴۹۶	۰٫۳۶۱	۳٫۳۸	۳٫۶۶۴
MnO	۰٫۵۹	۰٫۴۲	۰٫۳۶	۰٫۸۲	۰٫۷۴
MgO	۲۳٫۶	۲۶٫۸۶	۲۶٫۶۴	۲۱٫۰۶	۲۱٫۵۵
CaO	۱٫۴۸	۱٫۳۵	۱٫۴۸	۱٫۶۰	۰٫۹۰۹
Na_2O	۰	۰	۰	۰	۰
K_2O	۰	۰	۰	۰	۰
NiO	۰	۰	۰	۰	۰
مجموع	۹۹٫۶۵	۹۶٫۷۳	۹۹٫۰۲	۱۰۰٫۴۱۸	۱۰۱٫۱۳
Si	۱٫۸۶۱	۱٫۸۳۳	۱٫۸۵۳	۱٫۸۸۲	۱٫۸۷۴
Al^{IV}	۰٫۱۲۴	۰٫۰۸۶۵	۰٫۰۸۷۱	۰٫۱۱۸۳	۰٫۱۲۴
کل T(IV)	۲	۲	۱٫۹۴۰	۲	۲
Ti	۰٫۰۰۱۳	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۹۲	۰٫۰۰۸	۰٫۰۱۳
Al^{VI}	۰	۰	۰	۰٫۰۰۷	۰٫۸۸۶۹
Mg	۰٫۵۷۹	۰٫۸۳۹۹	۰٫۶۹۷	۰٫۵۸	۰٫۵۷۹
Cr	۰	۰	۰	۰	۰
Fe^{2+}	۰٫۳۰۸	۰	۰٫۰۱۹	۰٫۳۱۱	۰٫۳۰۸
Fe^{3+}	۰٫۱۰۲	۰٫۲۳۴	۰٫۱۸۹	۰٫۰۹۵	۰٫۱۰۲
کل M1(VI)	۱	۱	۱	۱	۱
Fe^{2+}	۰٫۳۲۷	۰٫۳۲۴	۰٫۳۲۴	۰٫۳۱۶	۰٫۳۲۷
Mg	۰٫۶۱۴	۰٫۷۷۱	۰٫۷۵۳	۰٫۵۹	۰٫۶۱۴
Mn	۰٫۰۲	۰٫۰۱۳۲	۰٫۰۱۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲۴
K	۰	۰	۰	۰	۰
Ca	۰٫۰۳۶	۰٫۰۵۳۲	۰٫۰۵۸	۰٫۰۶	۰٫۰۳۶
Na	۰	۰	۰	۰	۰
کل M2(VI)	۱	۱	۱	۱	۱
Mg#	۰٫۶۷	۰٫۷۳	۰٫۷۳	۰٫۶۲	۰٫۶۲
Q	۱٫۸۴۸۲	۱٫۸۲۶۷	۱٫۸۵۰۷	۱٫۸۶۴۱	۱٫۸۶۳۴
J	۰	۰	۰	۰	۰
En	۶۴٫۸۰۳	۷۱٫۰۸	۷۱٫۰۷۴	۵۹٫۸۶۳	۶۰٫۶۴۸
Fs	۳۲٫۲۲۸۰	۲۶٫۳۳۶	۲۶٫۰۸۳	۳۶٫۸۵۰	۳۷٫۵۱۳
Wo	۲٫۹۱۷	۲٫۵۸۱	۲٫۸۴۳	۳٫۲۸۷	۱٫۸۳۹
XPT	۳۴٫۹۲	۳۳٫۹۴	۳۴٫۶۲	۳۵٫۴۸	۳۷٫۵۶
YPT	-۲۶٫۴۶	-۲۹٫۷۳	-۲۹٫۴۷	-۲۵٫۷۸	-۲۵٫۷۷

تعیین سری ماگمایی

ترکیب پیروکسن می‌تواند بیانگر نوع ماگمایی باشد که کانی از آن شکل گرفته است. برای تعیین سری ماگمایی از نمودار Al_2O_3 نسبت به SiO_2 استفاده شده [۲۷] که نمونه‌ها در بخش نیمه آلکالن جایابی می‌شوند (شکل ۹ الف). همچنین نمونه‌ها نمودار TiO_2 نسبت به Al_2O_3 [۲] در گستره آهکی قلیایی قرار می‌گیرند (شکل ۹ ب). جانشینی پتاسیم در جایگاه A و Al^{IV} در جایگاه چاروجهی آمفیبول‌ها دو مؤلفه خوب برای تشخیص سری ماگمایی آمفیبول است [۲۸]. آمفیبول‌های

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]

مورد بررسی کلسیم و پتاسیم پایین دارند و از سری آهکی قلیایی هستند (شکل ۹ پ و جدول‌های ۱، ۳ و ۴).

بحث

تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی

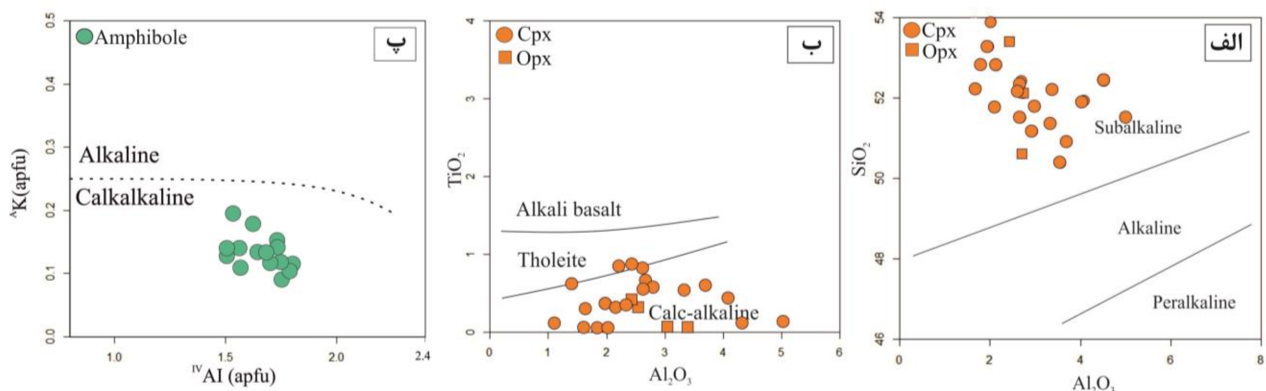
الف - فشاربخشی اکسیژن: فشاربخشی اکسیژن وابسته به ترکیب بلورهای آمفیبول و ترکیب مذاب حامل آن‌هاست. آمفیبول‌ها به دلیل گستره پایداری بالا، در زمان تبلور، شرایط و مقدار فشاربخشی اکسیژن را بخوبی در خود حفظ می‌کنند [۲۸]. در این پژوهش برای محاسبه مقدار فشاربخشی اکسیژن از رابطه مرجع [۲۸] استفاده شد که نتایج قابل اعتمادتری برای آمفیبول‌های سنگ‌های آتشفشانی آهکی قلیایی ارائه می‌دهد. در میان کاتیون‌های آمفیبول، Mg* بهترین همبستگی را با ▲NNO دارد. از این رو از شاخص منیزیم با بیشینه خطای واحد لگاریتم ۰٫۴۱ برای تعریف رابطه ▲NNO استفاده شد:

$$\blacktriangle NNO\ (log\ units) = 1.664Mg^* - 4.01 \quad R = 0.89$$

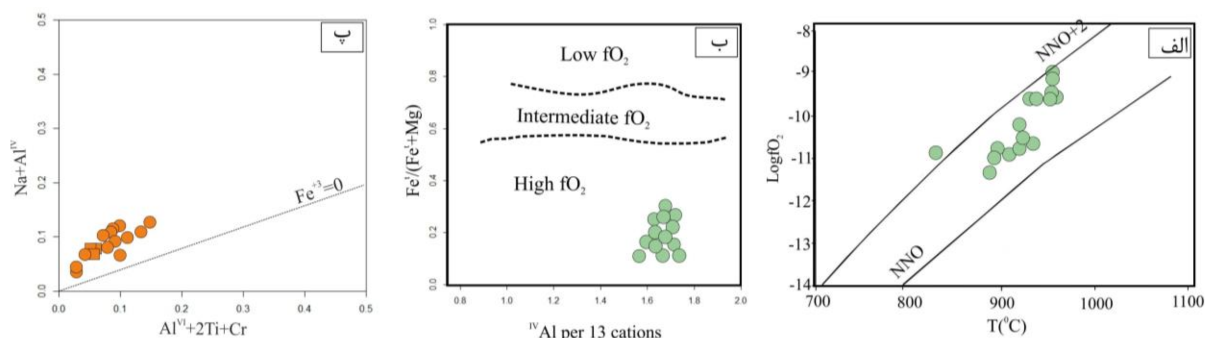
در حالیکه مقدار Mg* از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Mg^* = Mg\ (Si/47) - (^{VI}Al/9) - (1.3^{VI}Ti) + (Fe^{3+}/3.7) + (Fe^{2+}/5.2) - (^{B}Ca/20) - (^{A}Na/2.8) + (A/9.5).$$

براساس این روابط، $Log fO_2$ آمفیبول‌های سنگ‌های واحد آندزیتی در گستره ۹٫۱- تا ۱۱٫۲- است و همه نمونه‌ها در گستره بافرهای NNO و NNO+2 هستند (شکل ۱۰ الف، جدول ۱). این مقدار فشاربخشی اکسیژن با مقدار آب معمول در ماگماهای آهکی قلیایی یعنی ۳٫۷ تا ۸٫۲ درصد و ۱- <ΔNNO<۲٫۷+ همخوانی دارد [۲۸]. فشاربخشی اکسیژن آمفیبول به تغییرات Mg وFe حساس است. فشاربخشی اکسیژن بالا نشان می هد که کانی Mg بیشتر و Fe کمتری داشته است [۳۰] افزون بر این، Fe# نیز شاخصی برای ارزیابی فشاربخشی اکسیژن است. عدد آهن Fe# که Fe/(Fe+Mg) تعریف می‌شود کمتر از ۰٫۶ نشان‌دهنده فشاربخشی اکسیژن بالا، بین ۰٫۶ تا ۰٫۸ بیانگر فشاربخشی اکسیژن متوسط و بیش از ۰٫۸ گویای فشاربخشی اکسیژن پایین است. بر پایه نمودار Fe# نسبت به Al^{IV} [۳۱] و براساس محاسبات انجام شده، آمفیبول‌های مورد بررسی در گروه اول با فشاربخشی اکسیژن بالا جای دارند، بطوریکه مقدار $Fe^{\#}$ آن‌ها در سنگ‌های آندزیتی از ۰٫۲۶تا ۰٫۳۹ متغیر است. این عدد آهن نشانگر بالا بودن فشاربخشی اکسیژن و محیط اکسایشی در زمان تبلور و تشکیل آن‌هاست (شکل۱۰ب). براورد فشاربخشی اکسیژن بر پایه شیمی کانی پیروکسن نیز ممکن است و شرایط محیط مذاب را از نظر درجه اکسایش مشخص می‌نماید [۳۲]. به این منظور، از نمودار $Al^{VI}+2Ti+Cr$ نسبت به $Na+Al^{IV}$ [۳۳] استفاده شد (شکل ۱۰ پ). کاتیون‌هایAl^{IV}, Ti, Al^{VI} همبستگی بالایی دارند و بر اساس موازنه Al^{VI} در جایگاه چاروجهی و Al^{VI} و Cr^{3+}، Ti^{4+}در جایگاه هشت وجهی قرار می‌گیرند. از سویی، Fe^{3+} در پیروکسن‌ها می‌تواند جانشین عناصر Cr, Ti, Al^{IV} و عناصر ۳ ظرفیتی در مذاب شود [۳۴]. سنگ‌های آتشفشانی و کالک آلکالن سقز بالای خط$Fe^{3+}=0$ توزیع شده‌اند و نشان می‌دهند که در شرایط فشاربخشی اکسیژن بالا و محیط اکسایشی متبلور شده‌اند.



شکل ۹ الف موقعیت نمونه‌ها در نمودار Al_2O_3 نسبت به SiO_2 [۲۷]؛ ب) نمودار TiO_2 نسبت به Al_2O_3 که براساس آن نمونه‌ها ویژگی آهکی قلیایی دارند [۲]؛ پ) نمودار ^{IV}Al نسبت به ^{A}K[۲۹] که ویژگی آهکی قلیایی آمفیبول‌های نمونه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل۱۰ نمودارهای برآورد مقدار فشاربخشی اکسیژن: الف) تغییرات دمایی log fo2 [۲۸]، ب) نمودار مقدار Fe# نسبت به مقدار آلومینیوم کل (در واحد فرمولی) [۳۱] که نشان می دهد که نمونه های مورد بررسی گریزندگی اکسیژن بالایی دارند و پ) نمودار $Al^{VI}+2Ti+Cr$ نسبت به $(Na+Al^{IV})$[۳۳] که در آن، نمونه‌های واحد آندزیتی سقز در بالای خط $Fe^{3+}=0$ قرار دارند و گویای بالا بودن فشاربخشی اکسیژن ماگما در زمان تبلور پیروکسن‌هاست.

دما- فشار سنجی سنگ‌های مورد بررسی

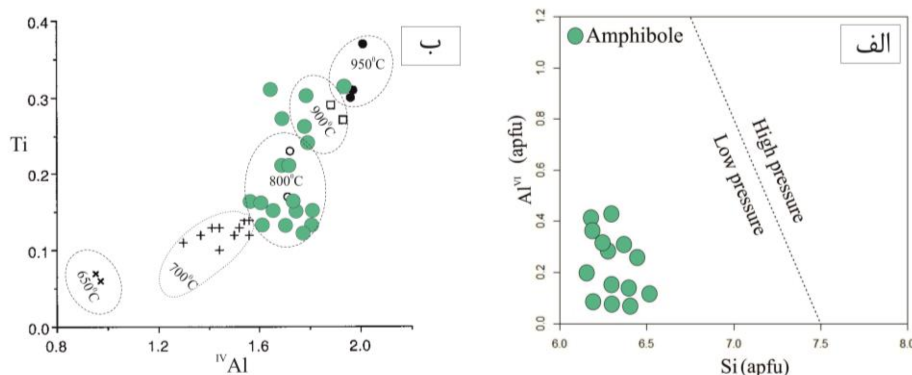
ارزیابی دما و فشار آمفیبول: برای برآورد دما و فشار زمان تبلور آمفیبول‌ها روشی بر پایه مقدار Al در ساختار کانی ارائه شده است [۲۸] که بویژه برای آمفیبول‌های با مقدار سیلیس پایین در مذاب‌های آهکی قلیایی مناسب است. این دمافشارسنج گستره وسیعی از شرایط دما از ۸۰۰ تا ۱۱۳۰درجه سانتی‌گراد و فشار ۱٫۳ تا ۲۲ کیلوبار (با درصد خطای ۲۳٫۵ ±T سانتی‌گراد و۱۱٫۵± P درصد) را محاسبه می‌کند. نتایج تجربی نشان داده است که Si و Al^{IV} در ترکیب آمفیبول وابسته به تغییرات دما هستند و برای تعیین شاخص *Si، کاتیون‌های دیگر چون Ti, Al, Fe, Mg, Na به فرمول محاسبه آمفیبول افزوده شدند [۲۸]:

$$T(C) = -151.487Si^* 2041; Si^* = Si + (^{IV}Al/15) - (2^{IV}Ti) - {}^{VI}Al/2) - (^{VI}Ti/1.8) - (Fe^{3+}/9) + (Fe^{2+}/3.3) + (Mg/26) + (^{B}Ca/5) + (^{B}Na/1.3) - (^{A}Na/15) + (A/2.3).$$

فشار بر پایه Al در ترکیب آمفیبول [۳۵،۲۸] محاسبه شد:

$$P(MPa) = 19.209e^{(1.438Altot)}$$

محاسبات نشان می‌دهد که آمفیبول‌های نمونه سنگ‌های آندزیتی مورد بررسی در دمای ۹۶۱-۸۹۵ °C با بیشینه دمای تبلور۹۶۱ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲٫۵۹-۴٫۱۱ کیلوبار متبلور شده‌اند که با دمای تبلور آمفیبول‌ها در مناطق فورانش (حدود ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد) همخوانی دارد [۳۶] (جدول ۵). Si و Al^{IV}دو عامل برای جدایش آمفیبول‌های کم فشار و پر فشار هستند. با افزایش فشار، مقدار Al^{VI} و Si بیشتری در این کانی وارد می‌شود [۳۷]. آمفیبول‌های مورد بررسی Si کمتر از ۷٫۵ و Al^{VI} به نسبت پایین دارند و کم فشار هستند (شکل۱۱ الف). Al^{IV} در آمفیبول‌های کلسیمی با افزایش دما و فشار افزایش یافته و همزمان با افزایش دما، Ti در جایگاه M_2 وارد می‌شود [۳۸]. در نمودار بر پایه ورود $Ti-{}^{IV}Al$ در شبکه آمفیبول، دمای ۸۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد برای آمفیبول‌های مورد بررسی برآورد شد (شکل۱۱ ب).



شکل۱۱ الف) نمودار Al^{VI} - Si [۳۷] که نشان‌دهنده تشکیل آمفیبول‌های مورد بررسی در فشار پایین است، ب) نمودار $Ti-{}^{IV}Al$ [۳۸] که نشان می‌دهد که آمفیبول‌های مورد بررسی در دمای ۸۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد متبلور شده‌اند.

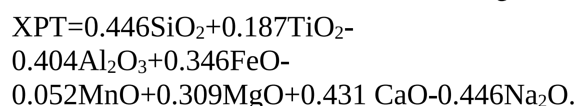
[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]

جدول ۵ نتایج محاسبه دما و فشار آمفیبول در سنگ‌های مورد بررسی براساس مرجع [۲۸].

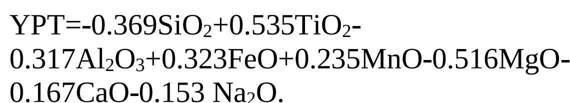
نمونه	ssq-50-1	ssq-50-2	ssq-50-3	ssq-50-4	ssq-50-5	ssq-50-6	ssq-43-1
T(°C)	۹۲۵	۹۵۰	۹۵۶	۹۵۴	۹۶۱	۹۶۰	۹۰۹
P(Kbar)	۲٫۹۲	۴٫۰۸	۴٫۰۶	۴٫۲۳	۴٫۵۹	۳٫۷۹	۲٫۶۱
نمونه	Ssq-43-2	Ssq-43-3	ssq-43-4	ssq-43-5	ssq-43-6	ssq-39-1	ssq-39-2
T(°C)	۹۱۷	۹۱۰	۹۴۱	۹۳۲	۹۳۲	۹۳۳	۹۱۲
P(Kbar)	۲٫۵۶	۲٫۵۰	۳٫۷۵	۲٫۶۲	۲٫۵۷	۳٫۵۹	۲٫۸۴
نمونه	ssq-39-3	ssq-39-4	ssq-39-5	Ssq-39-6	Ssq-39-7	ماگزیمم	T=۹۵۶ P=۴٫۵۹
T(°C)	۷۸۹	۸۸۷	۸۹۱	۸۷۵	۸۶۹	مینیمم	T=۸۶۹ P=۲٫۱۱
P(Kbar)	۲٫۲۱	۲٫۳۱	۲٫۴۷	۲٫۲۲	۲٫۱۱	میانگین	T=۹۱۵٫۵ P=۳٫۰۵

دماسنجی بر اساس شیمی پیروکسن: روش‌های متعددی برای دماسنجی و فشارسنجی با کارگیری ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها وجود دارد [۳۹،۱]. در ادامه نتایج کاربرد چند روش مختلف ارائه می‌شود (جدول ۶).

بر پایه ترکیب اکسیدهای اصلی کانی پیروکسن و شاخص‌های XPT وYPT، رابطه زیر برای ارزیابی دما تعیین شده است [۴۰] (شکل ۱۲):



$XPT=0.446SiO_2+0.187TiO_2-0.404Al_2O_3+0.346FeO-0.052MnO+0.309MgO+0.431\ CaO-0.446Na_2O.$



$YPT=-0.369SiO_2+0.535TiO_2-0.317Al_2O_3+0.323FeO+0.235MnO-0.516MgO-0.167CaO-0.153\ Na_2O.$

با استفاده از این روش، دمای تشکیل کلینوپیروکسن‌ها ۱۲۰۰-۱۱۰۰ºC (میانگین ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) و برای ارتوپیروکسن بین ۱۱۰۰ تا ۱۲۵۰ºC (میانگین ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد) به دست آمد (شکل ۱۳).

بر اساس ترکیب تک بلور-پیروکسن و با استفاده از فعالیت [۳۹] رابطه ای دقیق برای بررسی دما بر اساس تبادل میان بلوری کاتیون‌های Fe^{2+}-Mg در جایگاه‌های M1 و M2 برای رسیدن به دمای بسته شدن و تعادل بلور ارائه شده است [۱]:

$$T(K)=\frac{93100+544*p(kbr)}{61.1\ +\ 36.6(x^{Cpx}_{Ti})\ +\ 10.9(X^{Cpx}_{Fe})\ 0.95(X^{cpx}_{Al}+X^{cpx}_{cr}-X^{cpx}_{Na}-X^{CPX}_{K})\ +\ 0.395*[ln(a^{cpx}_{En})]2}$$

دمای محاسبه شده بر اساس این روش برای کلینوپیروکسن‌ها ۱۲۳۶-۱۱۵۶ ºC با میانگین ۱۱۸۴ درجه سانتی‌گراد است.

روشی برای دماسنجی جفت کلینوپیروکسن - ارتوپیروکسن بر اساس مبادله Ca و Mg در جایگاه M_2 پیروکسن پیشنهاد شده است [۴۱]:

$$Tsj(K)=\frac{4900}{1.807-lnKD(1)}$$

و بر این اساس دمای ۱۱۹۳- ۱۲۴۴درجه سانتی‌گراد برای سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی مورد بررسی بدست آمد. دماسنج تک بلور کلینوپیروکسن بر اساس تعادل Ca-Mg در کانی کلینوپیروکسن است [۴۲]:

$$Cpx(K)=\frac{33696+454.5*P(GPa)}{17.61-8.314*ln\frac{1-x^{M2}_{Ca}}{0.95}-12.13*(x^{M2}_{Ca}}$$

با استفاده از این رابطه، دمای ۱۱۲۱ تا ۱۲۹۴ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۱۲۲۲ درجه سانتی‌گراد برای آندزیت‌ها محاسبه گردید.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]

فشارسنجی بر اساس شیمی پیروکسن

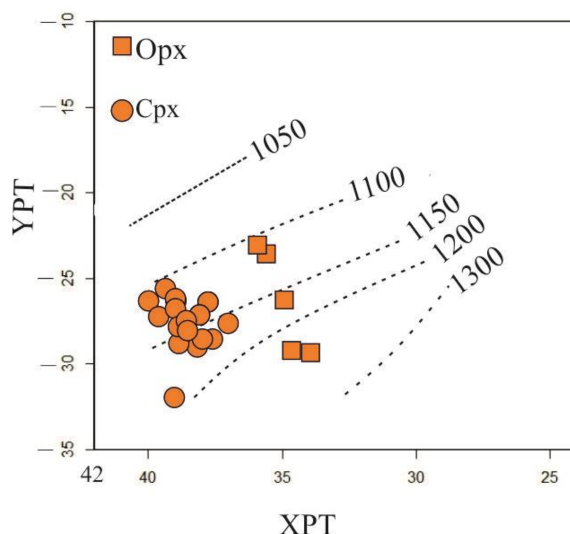
مقدار Al^{IV} و Al^{VI} در پیروکسن‌ها به فشار و دما وابسته هستند بطوریکه با افزایش فشار Al بیشتری در جایگاه هشت وجهی وارد می‌شود [۴۳]. کلینوپیروکسن‌ها و ارتوپیروکسن‌های آندزیت سقز با میانگین Al^{IV} به ترتیب ۰/۰۷۴ و ۰/۱۰۳ و نیز با دارا بودن Al^{IV}/Al^{VI} برابر با ۳/۶۲-۰/۲۲ در محیط با فشار پایین تا متوسط متبلور شده‌اند (شکل۱۳).

فشارسنجی نیز برای پیروکسن‌های غنی از کلسیم بر اساس ارتباط بینV_{M1} و V_{Cell}در طیف گسترده‌ای از سنگ‌های ماگمایی با $Mg/(Mg+Fe^{2+})>0.7$ $(Ca+Na) > 0.5$ a.p.f.u $Al_2O_3/SiO_2<0.375$ (wt%) و$Al_2O_3<18$ از مافیک تا فرامافیک در پوسته و گوشته ارائه شده است [۴۴]:

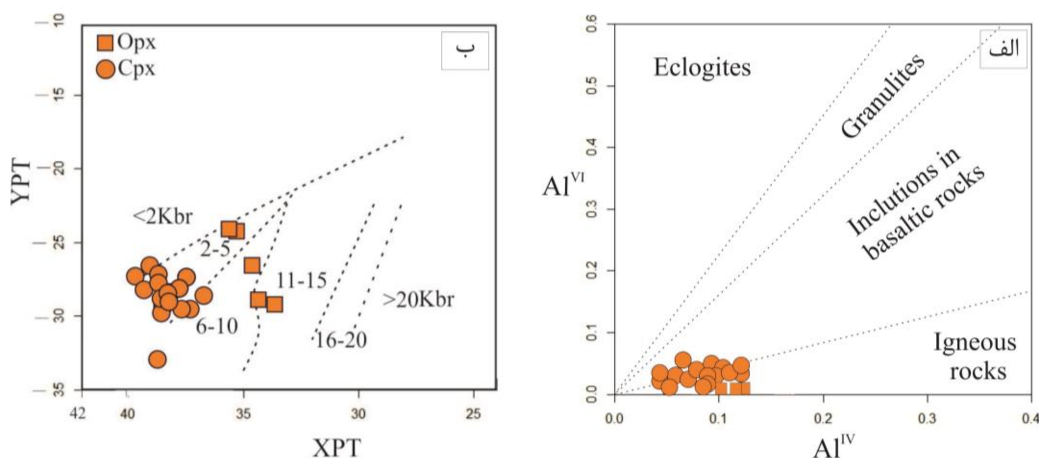
$$PNU_{BA}(\pm 1.70, Kbar)= 654.47 - 1.186*V_{cell}^{corr}\ (Å^3) -9.140*V^{corr}_{M1}\ (Å^3)$$

بر این اساس، فشار محاسبه شده برای کلینوپیروکسن برابر با ۴/۳ تا ۱۱/۵۲ کیلوبار است. فشارهای بالا در نمونه‌های مورد بررسی گویای تشکیل اولیه آن‌ها در مخزن ماگمایی است و با حرکت توده به سمت بالا و ادامه تبلور و جایگیری نهایی، کانی‌هایی با فشار پایین متبلور شده‌اند.

با فشارسنجی بر اساس مقادیر XPT و YPT [۴۰] نیز فشار تبلور برای کلینوپیروکسن سنگ‌های آندزیتی سقز برابر با ۲ تا۱۰ کیلوبار و برای ارتوپیروکسن بیش از ۱۰ کیلوبار به دست آمد.



شکل ۱۲ نمودار ارزیابی دما با استفاده از شاخص‌های XPT و YPT [۴۰].



شکل ۱۳ الف) نمودارAl^{IV} نسبت به Al^{VI} [۴۳] که در آن، کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی در بخش سنگ‌های آذرین و کم فشار جانمایی شده‌اند؛ ب) نمودار محاسبه فشار بر اساس ترکیب پیروکسن‌ها [۴۰] که سنگ‌های آندزیتی منطقه سقز بیشتر گستره ۲ تا ۱۰ کیلوبار را نشان می‌دهند.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]

جدول ۶ خلاصه نتایج فشار و دماسنجی کانی پیروکسن.

مرجع	[۳۹،۱]	[۴۲]	[۴۱]	[۴۴]
±۲٫۸۰		±۵۰	±۵	+۱٫۷۰
بیشینه	۱۲۳۶	۱۲۹۴	۱۲۴۴	۱۱٫۵۲
کمینه	۱۱۵۶	۱۱۲۱	۱۱۲۱	۴٫۳
میانگین	۱۱۸۴	۱۲۱۴	۱۲۲۲	۸٫۹۱

برداشت

سنگ‌های مورد بررسی در شمال پهنه سنندج–سیرجان و در استان کردستان شامل طیف وسیعی از سنگ‌های آتشفشانی بازالت، آندزیت، آندزی‌بازالت هستند. سنگ‌های آندزیتی از کانی‌های آمفیبول، کلینوپیروکسن، پلاژیوکلاز و ارتوپیروکسن تشکیل شده‌اند. بافت عمده این سنگ‌ها پورفیری، پورفیری تدریجی و گلومروپورفیری است و سرشت ماگماهای آهکی قلیایی را دارند. پلاژیوکلازها از نوع آندزین تا لابرادوریت هستند و مقدار آنورتیت بین ۳۹٫۲۳ تا ۶۸٫۷۰ درصد دارند. کانی‌های آمفیبول و پیروکسن ترکیب مذابی که از آن متبلور شده‌اند را به خوبی حفظ می‌کنند و از این رو گزینه مناسبی برای بررسی شرایط فیزیکوشیمیایی هستند. آمفیبول‌ها از نوع ماگمایی با ترکیب پارگازیت و چرماکیت، منیزیو هاستینگزیت و منیزیو هورنبلند هستند که در منطقه فروارنش متداولند. بر اساس بررسی شیمی‌کانی، نتایج دما و فشارسنجی بر پایه مقدار آلومینیوم در آمفیبول، دمای تبلور ۹۶۱ تا ۸۹۵ درجه سانتی‌گراد و فشار از ۲٫۵۹ تا ۴٫۱۱ کیلوبار به دست آمد. ترکیب پیروکسن در سنگ‌های مورد بررسی اوژیت و انستاتیت است. بر اساس ترکیب پیروکسن، دمای تبلور حدود ۱۱۰۰ تا ۱۲۹۴درجه سانتی‌گراد و فشار بین بیش از ۲ تا ۱۱ کیلوبار به دست آمد که فشار و دماهای بالاتر مربوط به ارتوپیروکسن‌هاست. افزون بر این، کانی‌های پیروکسن و آمفیبول فشاربخشی اکسیژن بالایی دارند که با تشکیل آن‌ها در محیط فروارنش و البته آبدار در تضاد نیست.

قدردانی

از دانشگاه بوعلی‌سینا برای تامین بخشی از هزینه تجزیه نمونه‌های این مقاله سپاسگزاری می‌گردد. همچنین از سردبیر و سایر مسئولین محترم مجله نیز کمال تشکر را داریم.

مراجع

[1] Putirka KD., *"Thermometers and barometers for volcanic systems"*, Reviews in mineralogy and geochemistry 69.1 (2008) 61-120. https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3.

[2] Le Bas MJ., *"The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage"*, American Journal of Science 260.4 (1962) 267-288. https://doi.org/10.2475/AJS.260.4.267.

[3] Leterrier J., Maury RC., Thonon P., Girard D., Marchal M., *"Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series"*, Earth and Planetary Science Letters 59.1 (1982): 139-154. https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90122-4.

[4] Beccaluva L., Macciotta G., Spadea P., *"Petrology and geodynamic significance of the Calabria- Lucania ophiolite"*, (1989).

[5] Şengör AC., Yilmaz Y., *"Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach"*, Tectonophysics 75.3-4 (1981) 181-241.

[6] Stampfli GM., Borel GD., *"A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons"*, Earth and Planetary science letters 196.1-2 (2002) 17-33. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00588-X.

[7] Agard P., Omrani J., Jolivet L., Mouthereau F., *"Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation"*, International journal of earth sciences 94 (2005) 401-419. https://doi.org/10.1007/s00531-005-0481-4.

[8] Hariri A., Farjandi F., Vaezipoor M., Sadegi A., *"Geology Map of Saqqez (Scale 1: 100000) No: 5262 (in Persian)"*, Geological Survey of Iran, Tehran (2003).

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]

hygrometers", Period Mineral 91 (2022) 63-87. https://doi.org/10.13133/2239-1002/17666.

[18] Papike JJ., *"Amphiboles and pyroxenes: Characterization of other than quadrilateral components estimates of ferric iron from microprobe data"*, Geological Society of America Abstract with Programs. Vol. 6. (1974).

[19] Leake BE., Woolley AR., Arps CE., Birch WD., Gilbert MC., Grice JD., Hawthorne FC., Kato A., Kisch HJ., Krivovichev VG., Linthout K., *"Nomenclature of amphiboles; report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineral ogical Association Commission on new minerals and mineral names"*, Mineralogical magazine 61 405 (1997) 295-310. http://dx.doi.org/10.1127/ejm/9/3/0623.

[20] Whitney DL., Evans BW., *"Abbreviations for names of rock-forming minerals"*, American mineralogist 95.1 (2010) 185-187. https://doi.org/ 10.2138/am.2010.3371.

[21] Ridolfi F., Renzulli A., *"Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1,130° C and 2.2 GPa"*, Contributions to Mineralogy and Petrology. 163 (2012) 877-895. https://doi.org/ 10.1007/s00410-011-0704-6.

[22] Sousa CS., Conceição H., Soares HS., Fernandes DM., da Silva Rosa MD., *"Magmatic processes recorded in plagioclase crystals of the Rio Jacaré Batholith, Sergipano Orogenic system, Northeast Brazil"*, Journal of South American Earth Sciences 118 (2022) 103942. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103942.

[23] Deer WA., Howie RA., Zussman J., *"An introduction to the rock-forming minerals"*, London Longman (1992).

[24] Morimoto N., *"Nomenclature of pyroxenes"*, Fortschr mineral 14.5 (1988) 198-221.

[25] Deer WA., Howie R A., Zussman J., *"Single-chain silicates London"*, Longman (1978).

[26] Aydin F., Karsli O., Sadiklar MB., *"Compositional variations, zoning types and petrogenetic implications of low-pressure clinopyroxenes in the Neogene alkaline volcanic rocks of northeastern Turkey"*, Turkish Journal of

[9] Gholipour S., Azizi H., Masoudi F., Asahara Y., Tsuboi M., *"Zircon U-Pb ages, geochemistry, and Sr-Nd isotope ratios for early cretaceous magmatic rocks, southern Saqqez, northwestern Iran"*, Geochemistry 81.1 (2021) 125687. https://doi.org/10.2138/am-1998-9-1004.

[10] Daneshvar N., Maanijou M., Azizi H., Asahara Y., *"Petrogenesis and geodynamic implications of an Ediacaran (550 Ma) granite complex (metagranites), southwestern Saqqez, northwest Iran"*, Journal of Geodynamics 132 (2019) 101669.
https://doi.org/ 10.1016/j.jog.2019.101669.

[11] Stocklin J., Nabavi MH., *"1/2,500,000 sheet, tectonic map of Iran (in Persian)"*, Geological Survey of Iran (1973).

[12] Azizi H., Kazemi T., Asahara Y., *"A-type granitoid in Hasansalaran complex, northwestern Iran: Evidence for extensional tectonic regime in northern Gondwana in the Late Paleozoic"*, Journal of Geodynamics 108 (2017) 56-72. https://doi.org/10.1016/j.jog.2017.05.003.

[13] Sepahi AA., Athari SF., *"Petrology of major granitic plutons of the northwestern part of the Sanandaj-Sirjan Metamorphic Belt, Zagros Orogen, Iran: with emphasis on A-type granitoids from the SE Saqqez area"*, Neues Jahrbuch Fur Mineralogie-Abhandlungen 183.1 (2006) 93-106. https://doi.org/ 10.1127/0077-7757/2006/0063.

[14] Mahmoudi S., Corfu F., Masoudi F., Mehrabi B., Mohajjel M., *"U–Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj–Sirjan Zone, Iran"*, Journal of Asian Earth Sciences 41.3 (2011) 238-249. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.03.006.

[15] Khodabandeh A.A., Zabihi M.R., Hadadan M., Yousefi Rad A., *"geological map of Miandoab (scale 1:100,000) No: (in Persian)"*, Geological Survey of Iran, Teharn (2003).

[16]Yavuz F., WinPyrox *"A Windows program for pyroxene calculation classification and thermobarometry"*, American Mineralogist 98.7 (2013) 1338-1359 .
https://doi.org/10.2138/am.2013.4292.

[17]Yavuz F., Yavuz EV., *"A Windows program for feldspar group thermometers and*

[35] Ridolfi F., Puerini M., Renzulli A., Menna M., Toulkeridis T., *"The magmatic feeding system of El Reventador volcano (Sub-Andean zone, Ecuador) constrained by texture, mineralogy and thermobarometry of the 2002 erupted products"*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 176.1 (2008) 94-106. https://doi.org/ 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.003.

[36] Davidson J., Turner S., Handley H., Macpherson C., Dosseto A., *"Amphibole sponge in arc crust?,"* 35.9 (2007) 787-790. https://doi.org/10.1130/G23637A.1.

[37] Ghoneim MF., *"Mineral chemistry of some gabbroic rocks of the central Eastern Desert, Egypt"*, Journal of African Earth Sciences (and the Middle East) 9.2 (1989) 289-295. https://doi.org/ 10.1016/0899-5362(89)90071-7.

[38] Ernst WG., Liu J., *"Experimental phase-equilibrium study of Al-and Ti-contents of calcic amphibole in MORB—A semiquantitative thermobarometer"*, American mineralogist 83.9-10 (1998) 952-969. https://doi.org/ 10.2138/am-1998-9-1004.

[39] Nimis P., Taylor WR., *"Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer"*, Contributions to Mineralogy and Petrology 139 (2000) 541-554. https://doi.org/10.1007/s004100000156.

[40] Soesoo A., *"A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: Empirical coordinates for the crystallisation PT-estimations"*, GFF 119.1 (1997) 55-60. https://doi.org/10.1080/11035899709546454.

[41] Sen G., Jones R., *"Experimental equilibration of multicomponent pyroxenes in the spinel peridotite field: Implications for practical thermometers and a possible barometer"*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth 94. B12 (1989) 17871-17880. https://doi.org/ 10.1029/JB094iB12p17871.

[42] Bertrand P., Mercier JC., *"The mutual solubility of coexisting ortho and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for the natural* Earth Sciences 18.2 (2009) 163-186. https://doi.org/10.3906/yer-0802-2.

[27] Nisbet EG., Pearce JA., *"Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings"*, Contributions to mineralogy and petrology 63.2 (1977) 149-160. https://doi.org/10.1007/BF00398776.

[28] Ridolfi F., Renzulli A., Puerini M., *"Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes"*, Contributions to mineralogy and petrology 160 (2010) 45-66. https://doi.org/ 10.1007/s00410-009-0465-7.

[29] Kilgore ML., Peslier AH., Brandon AD., Lamb WM., *"Water and oxygen fugacity in the lithospheric mantle wedge beneath the Northern Canadian Cordillera (Alligator Lake)"*, Geochemistry, Geophysics, Geosystems 1910 (2018) 3844-3869. https://doi.org/10.1029/2018GC007700.

[30] Sisson TW., Grove TL., *"Experimental investigations of the role of H_2O in calc-alkaline differentiation and subduction zone magmatism"*, Contributions to mineralogy and petrology 113 (1993) 143-166. https://doi.org/10.1007/BF00283225.

[31] Anderson JL., Smith DR., *"The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer, American mineralogist "*, 80 5-6 (1995) 549-559. https://doi.org/10.2138/am-1995-5-614.

[32] France L., Ildefonse B., Koepke J., Bech F., *"A new method to estimate the oxidation state of basaltic series from microprobe analyses, Journal of Volcanology and Geothermal Research"*, 189 3-4 (2010) 340-346. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.11.023.

[33] Schweitzer EL., Papike JJ., Bence AE., *"Statistical analysis of clinopyroxenes from deep-sea basalts"*, American Mineralogist. 64.5-6 (1979) 501-513. https://doi.org/ 10.1007/s00410-009-0465-7.

[34] Cameron M., Papike JJ., *"Structural and chemical variations in pyroxenes"*, American Mineralogist 66.1-2 (1981) 1-50.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]

[44] Nimis P., Ulmer P., *"Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks Part 1: An expanded structural geobarometer for anhydrous and hydrous, basic and ultrabasic systems"*, Contributions to Mineralogy and Petrology 133.1 (1998) 122-135.
https://doi.org/10.1007/s004100050442.

system?", Earth and Planetary Science Letters 76.1-2 (1985) 109-122.
https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90152-9.

[43] Aoki KI., *"Kushiro I., Some clinopyroxene from ultramafic inclusions in Dreiser Weiher, Eifel"*, Contributions to Mineralogy and Petrology 18 (1968) 326-337.
https://doi.org/10.1007/BF00399694.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.339]